

# **DESEMPENHO HIDRÁULICO DE EXUTORES SUBMARINOS**

**PÉRICLES SEMEDO FREIRE**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM HIDRÁULICA**

---

Orientador: Professor Doutor Manuel Maria Pacheco Figueiredo

JUNHO DE 2013

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2012/2013**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

TEL. +351-22-508 1901

FAX +351-22-508 1446

✉ [miec@fe.up.pt](mailto:miec@fe.up.pt)

*Editado por*

*Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*

*Rua Dr. Roberto Frias*

*4200-465 PORTO*

*Portugal*

*Tel. +351-22-508 1400*

*Fax +351-22-508 1440*

✉ [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2012/2013 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais,  
Orlando e Julieta







## **AGRADECIMENTOS**

Ao terminar a realização deste trabalho gostaria de expressar aqui a minha gratidão a todos aqueles que contribuíram duma forma direta ou indireta para a concretização do mesmo.

Ao meu orientador, Professor Doutor Manuel Maria Pacheco Figueiredo, pela paciência e boa vontade demonstrada ao longo da realização do mesmo, corrigindo e indicando a melhor direção a seguir, incentivando o rigor científico e a análise crítica dos resultados.

Aos meus pais, Orlando e Julieta, aos meus irmãos, Sandra, Paulo e Nelson por sempre acreditarem em mim, pelo tempo que se privaram da minha companhia ao longo destes anos e pelo apoio prestado ao longo de toda a minha vida.

À Ana Fernandes, pela sua presença e incentivo durante o meu percurso académico.

Ao Nelson Carvalho e ao Adriano, pela ajuda prestada ao longo da elaboração deste trabalho.

Aos meus colegas e amigos que estiveram ao meu lado durante o meu percurso académico: Ângelo, Yannick, Wilson, Aires, Mikael, Jota, Evaldino, Décio, Loleny, Lino, Cesário, Bruno, Alexandre Monte e Walter Borges.





## RESUMO

Nos centros urbanos próximos das orlas marítimas, tem-se optado pela descarga de águas residuais para o mar, aproveitando-se da elevada capacidade de depuração do oceano. Neste trabalho coloca-se o seguinte desafio: será possível um programa usado para a modelação de rede de distribuição de água ser capaz de modelar um exutor submarino?

Para responder a este desafio, recorreu-se a um conjunto de artifícios, tendo por base conhecimentos da hidráulica. Foi construído um modelo unidimensional usando o EPANET cujas fronteiras são: a montante, a Câmara de Carga, a jusante os difusores. Recorreu-se aos componentes do EPANET, tais como: válvulas TCV (*Throttle Control Valve*) e reservatórios de nível fixo para simular a descarga e o nível de maré respetivamente.

A modelação hidráulica de um exutor submarino tem implicações no impacto da descarga pelo que torna-se necessário o estudo da diluição inicial conseguida numa descarga.

No presente trabalho desenvolveu-se um programa EPANET / MatLab com o objetivo de facilitar a aplicação desses artifícios e de estimar a diluição inicial. Aplicou-se o programa desenvolvido num caso de estudo e utilizou-se a versão beta do CORHYD, usado em obras de engenharia com alguma importância, para validar os resultados obtido através do programa EPANET /MatLab.

**PALAVRAS-CHAVE:** EXUTORES SUBMARINOS, DESEMPENHO HIDRÁULICO, MODELAÇÃO NUMÉRICA, EPANET, MATLAB, CORHYD.



## **ABSTRACT**

In the urban centers, near the coastlines, it has been chosen the discharge of wastewater into the sea, taking into account the advantage of the high capacity debugging ocean. In this work, it was placed the following challenge: what program can be used for the modeling of water distribution network to be able to model an outfall?

To answer this challenge, it was used a set of devices, based on knowledge of hydraulics, acquired during the course. One-dimensional model was built using the EPANET program, whose boundaries were: upstream, the Loading Chamber, downstream and the diffusers. Resorted to the EPANET components, such as the Thorottle Control Valve (TCV) valves and fixed level reservoirs to simulate discharge and tide level respectively. The hydraulic modeling of an outfall has implications for the impact of the discharge so that it becomes necessary to study the initial dilution achieved in a discharge.

In this work, it was developed the EPANET/MatLab program in order to facilitate the implementation of the devices and estimate the initial dilution. It was employed the developed software in study case and it was used the CORHYD program, which is used in the engineering works of some importance, to validate the results obtained with the EPANET/MatLab program.

**Keywords:** OUTFALLS, HYDRAULIC PERFORMANCE, NUMERICAL MODELLING, EPANET, CORHYD.



## SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

$Q_T$	- Caudal Total descarregado [ $m^3/s$ ]
$C_d$	- Coeficiente de vazão do orifício [Adimensional]
$S_0$	- Área da secção do orifício [ $m^2$ ]
$\Delta h$	- Perda de carga no orifício [m]
$U_{dif}$	- Velocidade no difusor
$\Delta H_T$	- Perda de carga total entre o orifício i e o orifício i+1 [m]
$\Delta H_C$	- Perda de carga continua entre o orifício i e o orifício i+1 [m]
$\Delta H_L$	- Perda de carga localizada entre o orifício i e o orifício i+1 [m]
$\Delta Z_i$	- Desnível entre o orifício i e o orifício i+1 [m]
$\rho_{efluente}$	- Massa Volúmica do efluente [ $kg/m^3$ ]
$E_i$	- Carga Efetiva sobre o orifício i [m]
$q_i$	- Caudal descarregado no orifício i
$s$	- Espaçamento dos orifícios ou <i>riser</i> [m]
$S_n$	- Diluição mínima [Adimensional]
$b$	- Impulsão da massa específica [m]
$H$	- Profundidade de descarga [m]
$q$	- Caudal por unidade de comprimento do difusor [ $m^2/s$ ]
$x_n$	- Extensão da pluma [m]
$h_n$	- Espessura da Pluma [m]
$Q_j$	- Caudal descarregado por cada jato [ $m^3/s$ ]
$Fr$	- Número de Froude
$u$	- Velocidade da corrente marítima [m/s]
$N$	- Frequência de Brunt -Vaisala
$l_b$	- Escala de comprimentos associada aos efeitos densimétricos e à estratificação
$z_n$	- Altura da diluição mínima [m]
$Z_{máx}$	- Altura máxima da pluma [m]
$\sigma_s$	- Tenção de cálculo admissível em condutas [Pa]
$\sigma_{s,50 \text{ anos}}$	- Resistência mínima requerida ao fim de 50 anos e a 20 °C [Pa]
$C$	- Coeficiente de segurança
$MRS$	- Tensão mínima requerida [Pa]
$ZH$	- Zero Hidrográfico
$H_{R,i}$	- Carga hidráulica no reservatório ligado ao orifício i [m]
$H_{maré}$	- Altura da maré, medida em relação ao ZH [m]
$\rho_{mar}$	- Massa Volúmica de água do mar [ $kg/m^3$ ]
$Z_{0,i}$	- Cota do orifício de saída, medida
$T$	- Temperatura de água do mar [°C]
$S$	- Salinidade de água do mar [psu]
$psu$	- Practical Salinity Units ou Unidades de Salinidade
$p_{d,i}$	- Pressão no interior do difusor imediatamente à montante do <i>riser</i> [Pa]
$P_{a,i}$	- Pressão da água do mar [Pa]
$C_{c,i}$	- Coeficiente de contração do jato
$Z_{d,i}$	- Distância do eixo do difusor ao plano de referência [m]
$Re$	- Número de Reynolds
$k_s$	- Rugosidade das paredes [m]
$\lambda_{d,i}$	- Coeficiente de atrito
$DN$	- Diâmetro nominal [m]
$K_{loc}$	- Coeficiente de perda de carga localizada
$\nu$	- Coeficiente de viscosidade cinemática [ $m^2/s$ ]



# Índice

<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>i</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>v</b>
<b>1. Introdução.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Descarga de efluentes .....</b>	<b>3</b>
2.1. INTRODUÇÃO .....	3
2.2. EXUTORES SUBMARINOS.....	3
2.3. SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS URBANAS EM ZONAS COSTEIRAS .....	4
2.4. CONTROLO DE DESCARGA DE ÁGUAS RESIDUAIS URBANAS EM ZONAS COSTEIRO.....	5
2.5. DILUIÇÃO INICIAL.....	5
<b>3. Exutores.....</b>	<b>9</b>
3.1. INTRODUÇÃO .....	9
3.1.1. PARÂMETROS DE DIMENSIONAMENTO.....	9
3.1.2. MODELO DE CÁLCULO.....	10
3.1.3. CÁLCULO DA DILUIÇÃO INICIAL.....	13
3.2. TIPOS DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO .....	21
3.3. TÉCNICAS DE INSTALAÇÃO - FLOAT AND SINK .....	22
<b>4. Modelos computacionais .....</b>	<b>25</b>
4.1. INTRODUÇÃO .....	25
4.2. MODELO DE CÁLCULO. SIMULADOR EPANET .....	25
4.3. CORHYD .....	34
4.3.1. MODELO DE CÁLCULO.....	34
4.3.2. HIPÓTESES DE CÁLCULO ASSUMIDAS PELOS AUTORES .....	36
4.3.3. DADOS DE ENTRADA .....	37
4.3.4. RESULTADOS.....	40
<b>5. Caso de Estudo .....</b>	<b>41</b>
5.1. INTRODUÇÃO .....	41
5.2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA .....	41

5.2.1.	CÂMARA DE CARGA .....	41
5.2.2.	EMISSÁRIO .....	41
5.2.3.	DIFUSOR .....	41
<b>5.3.</b>	<b>SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS DE EXPLORAÇÃO.....</b>	<b>42</b>
5.3.1.	CENÁRIOS DE EXPLORAÇÃO.....	42
<b>5.4.</b>	<b>MODELAÇÃO EM EPANET .....</b>	<b>42</b>
5.4.1.	PERDA DE CARGA LOCALIZADA.....	43
5.4.2.	CALIBRAÇÃO DO MODELO .....	44
<b>5.5.</b>	<b>MODELAÇÃO EM CORHYD.....</b>	<b>44</b>
<b>5.6.</b>	<b>ANÁLISE CONJUNTA DOS CENÁRIOS SIMULADOS .....</b>	<b>45</b>
<b>6.</b>	<b>Considerações finais .....</b>	<b>51</b>
6.1.	CONCLUSÃO .....	51
6.2.	DESENVOLVIMENTO DE TRABALHOS FUTUROS .....	51
<b>7.</b>	<b>Referências .....</b>	<b>53</b>
<b>Anexo</b>	<b>.....</b>	<b>57</b>







## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 - Componentes de um Exutor submarino. Fonte: Manual CORHYD [1] .....	4
Fig. 3 - Diluição inicial segundo Roberts (1989) - (Referenciado. por Monteiro e Sousa, 1998 [6]).....	6
Fig. 2 - Exutores submarinos existentes na costa portuguesa (Cit. por Santos <i>et al.</i> ,2011 [4]).....	7
Fig. 4 - Esquema de análise do procedimento de cálculo para dimensionamento de um exutor submarino (Fonte: Neves,1986). ....	11
Fig. 5: Definição dos parâmetros da pluma (Extraído de Xiandong et al (I)). $x_n$ é extensão da pluma; H é a profundidade de descarga; $h_n$ é a espessura da pluma. ....	14
Fig. 6: Fluxograma desenvolvido para estimar a diluição inicial (cenário 1). ....	15
Fig. 7: Definição dos parâmetros da plumaI (Extraído de Xiandong et al (II)) $x_n$ é extensão da pluma; H é a profundidade de descarga; $h_n$ é a espessura da pluma. ....	16
Fig. 8: Fluxograma desenvolvido para estimar a diluição inicial (cenário 2) .....	17
Fig. 9: Definição dos parâmetros da pluma. (Extraído de Xiandong et al (III)) $x_n$ é extensão da pluma; $h_n$ é a espessura da pluma; $Z_{max}$ é altura máxima de ascensão da pluma.....	18
Fig. 10: Fluxograma desenvolvido para estimar a diluição inicial (cenário 3) .....	19
Fig. 11: Definição dos parâmetros da pluma (Extraído de Xiandong et al (III)) $x_n$ é extensão da pluma; $Z_n$ é altura média da pluma; $Z_{max}$ é altura máxima de ascensão da pluma. ....	20
Fig. 12: Fluxograma desenvolvido para estimar a diluição inicial (cenário 4) .....	21
Fig. 13- Float and Sink – Pipelife Norge As .....	23
Fig. 14 - Esquema geral do modelo EPANET .....	26
Fig. 15 - Detalhe da modelação de um <i>riser</i> .....	27
Fig. 16 - Fluxograma geral do programa EXUTOR.....	29
Fig. 17 - Fluxograma de entrada de dados .....	30
Fig. 18 - Fluxograma de cálculo hidráulico.....	31
Fig. 19 -Fluxograma para a opção <i>Rise</i> .....	32
Fig. 20 -Fluxograma para a opção orifício.....	33
Fig. 21 - Esquema de análise orifício a orifício: $p_{a,i}$ = Pressão ambiente, $q_i$ =descarga no orifício i, $p_{d,i}$ = pressão no interior do difusor imediatamente a montante do <i>riser</i> , $Z_{di}$ = distância do eixo do difusor ao plano de referência, H=distância do nível do mar. Fonte: Manual CORYHD.....	34
Fig. 22: Perdas de carga localizadas no difusor.....	37
Fig. 23 - Sistema de coordenadas utilizados pelos autores do CORHYD Fonte: Manual CORYHD .....	38
Fig. 24 - Interface gráfica do programa CORHYD. Fonte: Manual CORYHD .....	39
Fig. 25 -Esquema de modelação do caso de estudo em EPANET.....	43
Fig. 26: Introdução dos dados no programa CORHYD.....	44
Fig. 27: Simulação do cenário A.1 versão Orifícios.....	45
Fig. 28: Simulação do cenário A.2 versão Orifícios.....	45
Fig. 29: Simulação do cenário A.3 versão Orifícios.....	46
Fig. 30: Simulação do cenário A.1.....	47
Fig. 31: Simulação do cenário A.2.....	47
Fig. 32: Simulação do cenário A.3.....	48
Fig. 33: Valores estimados para a diluição para os Orifícios .....	49
Fig. 34: Valores estimados para a diluição para os <i>risers</i> .....	50



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Simulações - Resumo de dados e resultados para orifício.....	46
Tabela 2: Simulações - Resumo de dados e resultados para <i>riser</i> .....	48



# 1. INTRODUÇÃO

As povoações dos centros urbanos próximos da orla marítima têm-se aproveitado da capacidade de depuração do oceano para o lançamento de águas residuais no mar.

O lançamento passa pela utilização de um exutor ou exutor submarino que consiste numa estrutura hidráulica que transporta as águas residuais até a uma certa distância da costa onde realiza-se a descarga. Essa descarga pode ser nociva para a fauna marítima quando executada sem controlo, pelo que atualmente é exigido um tratamento de águas residuais mínimo secundário para evitar estas situações.

No exutor submarino, sendo um “órgão vivo”, é preciso realizar várias intervenções ao longo dos anos de exploração. Estas intervenções devem ser realizadas cuidadosamente com o objetivo de proporcionar maior eficiência à instalação. Nessas operações, são usadas programas de cálculo automático que simulam e controlam a descarga ao longo dos anos.

No presente trabalho desenvolve-se uma metodologia, apoiada na combinação EPANET/MatLab, que se espera ser uma alternativa aos programas existentes no mercado.

O trabalho está dividido em 6 capítulos, dos quais passaremos a fazer uma breve apresentação:

No capítulo 2, tecem-se considerações sobre a descarga no mar e os níveis de tratamento de águas residuais que são exigidos.

O capítulo 3 é dedicado essencialmente ao estudo dos exutores fazendo a abordagem ao cálculo hidráulico, o processo de diluição inicial e os processos construtivos envolvidos na concepção de um exutor.

No capítulo 4 é realizada uma descrição em pormenor do modelo de cálculo desenvolvido e do programa CORHYD usado para validar o modelo desenvolvido.

O capítulo 5 consiste na aplicação do modelo de cálculo desenvolvido a um caso de estudo e procede-se à comparação dos resultados obtidos com o programa CORHYD.

No sexto e último capítulo, são tiradas algumas conclusões sobre a aplicação do modelo desenvolvido.





## 2. DESCARGA DE EFLUENTES

### 2.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo pretende-se fazer uma breve referência às questões relacionadas com a descarga de águas residuais no mar, tais como: os tratamentos exigidos para a descarga no oceano; o controlo da descarga, principalmente, e a questão da diluição de águas residuais que é um fator chave na descarga, uma vez que a eficiência ou não de um exutor está ligado à capacidade de permitir uma boa diluição, com implicações na qualidade do meio recetor.

### 2.2. EXUTORES SUBMARINOS

As águas residuais provenientes da população próxima da orla marítima são frequentemente descarregados no mar através dos exutores submarinos.

Os exutores submarinos são instalações hidráulicas que transportam as águas residuais até a uma certa distância da costa e promovem a sua diluição, aproveitando a elevada capacidade de autodepuração do oceano. São constituídos por três componentes principais:

- câmara de carga;
- emissário ou conduta de alimentação, responsável pelo transporte dos efluentes até ao local da descarga;
- difusor – É um trecho final da tubagem, com orifícios abertos espaçadamente através dos quais é realizado a descarga do efluente; Quando se pretende realizar a descarga a um nível superior ao do difusor são utilizadas tubos verticais de diâmetro igual ao dos orifícios (*risers*).

Na Figura 1 pode-se visualizar os seus três componentes em perfil longitudinal e numa secção transversal de um *riser*.

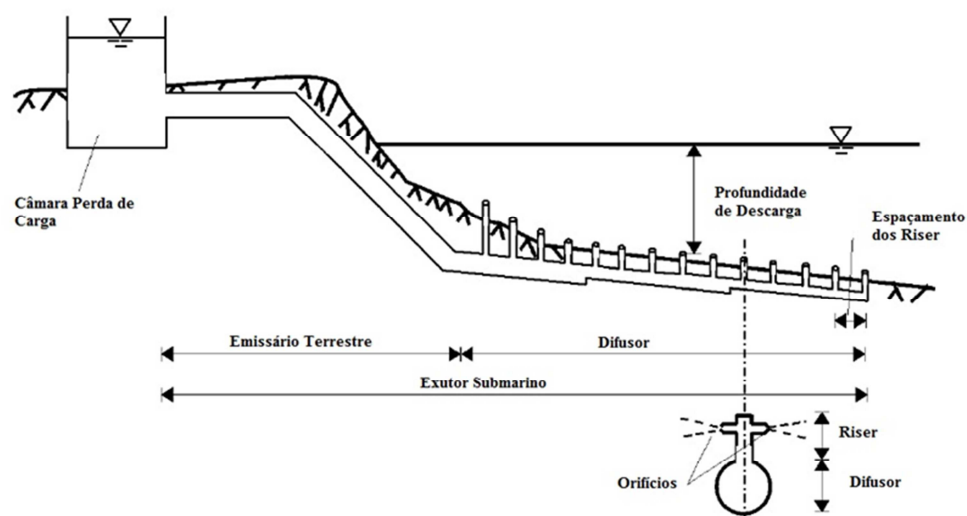


Fig. 1 - Componentes de um Exutor submarino.

Fonte: Manual CORHYD [1]

### 2.3. SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS URBANAS EM ZONAS COSTEIRAS

Entende-se por águas residuais domésticas urbanas, as águas residuais provenientes essencialmente do metabolismo humano e de atividades domésticas, ou a mistura de águas residuais domésticas com as águas industriais provenientes de instalações utilizadas para comércio ou indústria.

Segundo Cheng [2], o caudal de águas residuais domésticas é proporcional ao número de residentes e ao seu hábito de utilização de água. Atualmente em Portugal a captação de água situa-se entre 100 a 200 L/hab/d, o que normalmente inclui as utilizações comerciais, institucionais e industriais.

Segundo o mesmo Autor, a qualidade das águas residuais é caracterizada através de vários parâmetros, sendo que, para efeitos de tratamento e descarga, os mais relevantes são: Carência Bioquímica de Oxigênio (CBO), Sólidos Suspensos Totais (SST), Carência Química de Oxigênio (CQO), Nitratos (NT) e Fósforo (PT).

Face à grande variabilidade em termos de qualidade e de composição e atendendo aos riscos que a sua composição comporta para o meio ambiente e à saúde pública, as águas residuais são encaminhadas através de coletores para a estação de tratamento de águas residuais onde são submetidas a um tratamento adequado.

O tratamento a que as águas residuais urbanas (ARU) são sujeitas é destinado à redução de Sólidos Suspensos Totais, do Azoto Total, Carência Bioquímica de Oxigênio e Fosforo Total, através de várias etapas de tratamento que poderão ser preliminar, primário, secundário e o terciário. O tratamento preliminar tem como objetivo a remoção de sólidos de grandes dimensões, de areias e de óleos e gorduras. O tratamento primário por sua vez tem como objetivo a remoção de sólidos sedimentáveis e da gordura remanescente. A remoção de matéria orgânica dissolvida, conversão de compostos de azoto e fosforo, é realizada no tratamento secundário. O tratamento terciário tem como objetivo a remoção de azoto, fósforo e metais pesados [2].

## 2.4. CONTROLO DE DESCARGA DE ÁGUAS RESIDUAIS URBANAS EM ZONAS COSTEIRO

Segundo Freire [3], na hora de decidir que solução adotar para o tratamento de águas residuais urbanas em zona costeira, haverá que escolher a localização mais favorável, quer quanto à localização da infraestrutura em terra, quer quanto ao impacto da descarga no meio recetor, e haverá, como tal, que avaliar a resposta do meio recetor. Em Portugal o meio recetor é o meio hídrico, isto é, rios e oceanos.

De acordo com o que foi referido anteriormente, facilmente conclui-se que o nível de tratamento e a solução tecnológica a adotar influencia a qualidade da massa de água na zona da descarga. Para a descarga no mar é exigido um tratamento de nível secundário para as águas residuais antes da descarga, sendo que o oceano, devido à sua capacidade de autodepuração, consegue através de um processo natural reduzir a concentração dos parâmetros mencionados na secção 2.3.

Segundo Santos *et al.* [4], existem dezoito exutores submarinos ao longo da costa portuguesa. Na Figura 2 estão representados esses exutores.

## 2.5. DILUIÇÃO INICIAL

A exigência da instalação de um difusor na extremidade de um exutor deve-se à necessidade de, para além de realizar a descarga, garantir uma maior diluição inicial, recorrendo a jatos turbulentos com intuito de evitar que se formem superfícies em profundidade que inibam a dispersão e a mortalidade dos poluentes descarregados em consequência de diferenças densimétricas.

Segundo Neves [5], quando os orifícios estão muito espaçados, os jatos descarregados não interagem entre si e comportam-se como um jato individual. Quando estão pouco espaçados, os jatos interagem entre si, comportando-se como uma descarga através de uma fenda.

A descarga de águas residuais no mar através de jatos turbulentos foi objeto de estudos de muitos autores tais como: Cerdwall, Roberts, entre outros, tendo por base técnicas de análise dimensional. Xiaodong *et al.* são autores de estudos mais recentes sobre a diluição. No estudo desenvolvido por Xiaodong *et al.*, inseriram a corrente marítima perpendicularmente ao difusor, baseando-se em técnicas de análise dimensional para estudar a diluição inicial. A opção em fazer a análise da diluição com corrente marítima perpendicular ao difusor teve por base os estudos desenvolvidos por Roberts (1989) representada na Figura 3. Na Figura indicada, a ordenada representa a diluição mínima conseguida para diferentes ângulos do exutor submarino com a corrente marítima e as abcissas representam o número de Froude da corrente.

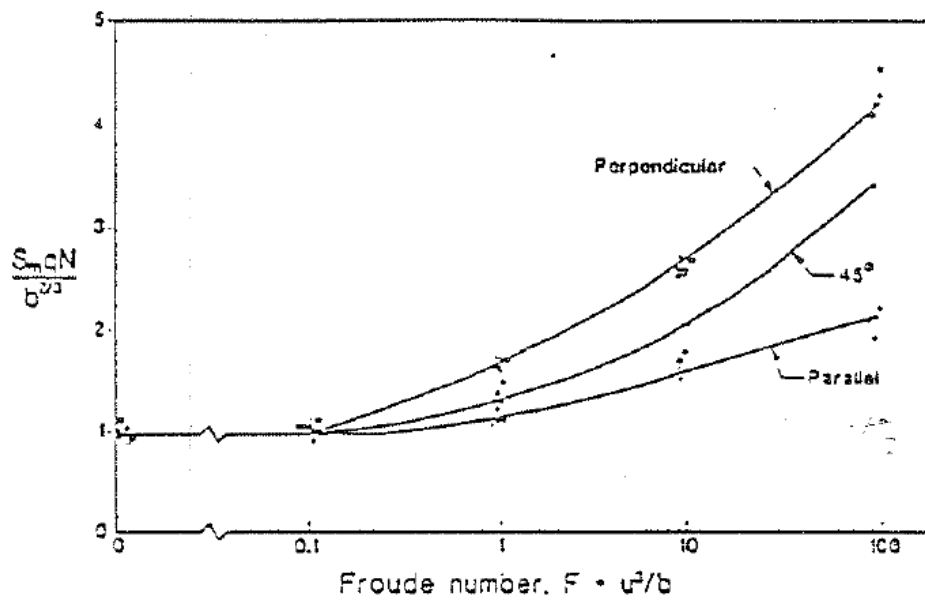


Fig. 2 - Diluição inicial segundo Roberts (1989) - (Referenciado. por Monteiro e Sousa, 1998 [6]).

Pela análise da figura percebe-se que para a velocidade da corrente normal ao difusor, a diluição inicial conseguida é maior.

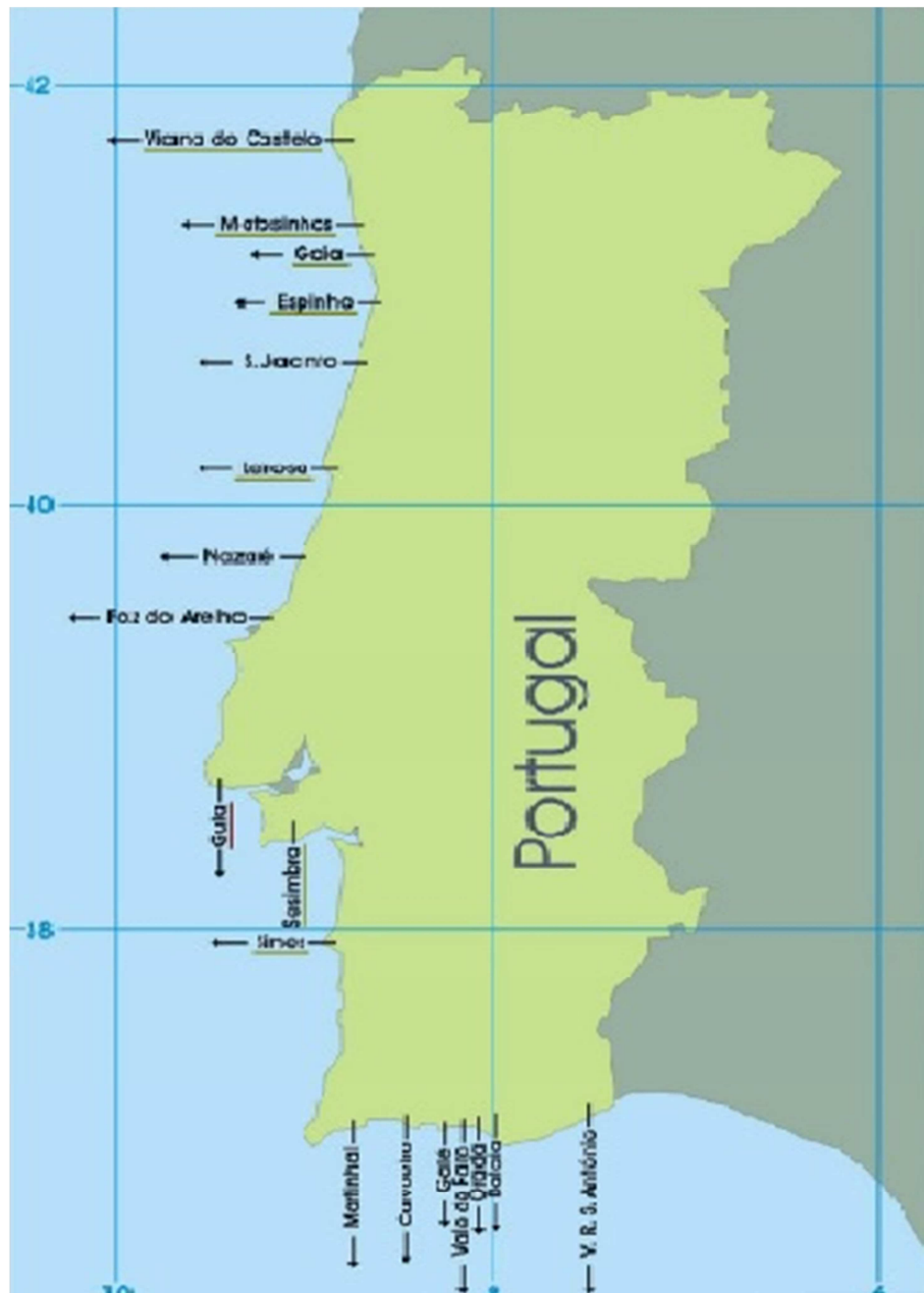


Fig. 3 - Exutores submarinos existentes na costa portuguesa (Cit. por Santos *et al.*,2011 [4]).



## 3. EXUTORES

### 3.1. INTRODUÇÃO

Pretende-se neste capítulo passar em revista as contribuições científicas para a concepção de um exutor submarino. Esta abordagem englobará o cálculo hidráulico, o processo de diluição inicial e os processos construtivos envolvidos na concepção de um exutor.

#### 3.1.1. PARÂMETROS DE DIMENSIONAMENTO

Como já foi referido no capítulo 2, os difusores são constituídos por pequenos orifícios que fazem a descarga e a diluição de águas residuais.

Segundo Monteiro e Sousa, 1998 [6], a concepção do difusor deve ser de tal ordem que garanta que o caudal seja igualmente distribuído por todos os orifícios ao longo do difusor. Ainda, segundo o mesmo autor, a distribuição uniforme do efluente não constitui o único aspeto a ter em conta na concepção do difusor, sendo que outros aspetos deverão ter tidos em conta, nomeadamente:

1. o escoamento ao longo do difusor deverá ter velocidades mínimas para evitar a deposição dos sólidos em suspensão no efluente;
2. dever-se-á prever, em projeto, uma concepção que permita a manutenção e limpeza do difusor;
3. dever-se-á assegurar que não exista intrusão salina no exutor e que todos os orifícios funcionem em secção cheia;
4. dever-se-á manter a perda de carga relativamente baixa para diminuir os custos de energia.

Para que os difusores obedeçam a estes requisitos pode ser conveniente adotar os seguintes procedimentos:

1. reduzir o diâmetro da tubagem ao longo do difusor;
2. prever uma tampa no fim do difusor facilmente acessível e desmontável para limpeza e manutenção;
3. adotar orifícios de pequena área para que a área total de orifícios a jusante de qualquer secção seja menor que a área da tubagem nessa secção;
4. adotar orifícios com os bordos arredondados de forma a diminuir as perdas de carga.

### 3.1.2. MODELO DE CÁLCULO

Um dos objetivos do dimensionamento de Exutores submarinos é manter a perda de carga relativamente baixa. O problema hidráulico por detrás do modelo de cálculo deve essencialmente acautelar dois aspetos: primeiro, a existência de uma diferença de densidade entre o efluente e a água do mar; segundo, o facto da perda de carga, associada à variação da profundidade ao longo do difusor, modificar as pressões nos orifícios ou *risers*.

O cálculo hidráulico do difusor passa pelo conhecimento da lei de vazão dos orifícios. A lei de vazão de um orifício pode ser expressa na através da seguinte equação;

$$Q_o = C_d S_o \sqrt{2g\Delta h} \quad (1)$$

sendo

$Q_o$ : caudal escoado através do orifício (m<sup>3</sup>/s);

$C_d$ : coeficiente de vazão do orifício (adimensional);

$S_o$ : área da secção do orifício (m<sup>2</sup>);

$\Delta h$ : perda de carga no orifício (m) (i.e. diferença de carga entre o interior e o exterior do difusor)

O coeficiente de vazão do orifício,  $C_d$ , é determinado experimentalmente; no caso dos difusores, Vigander et al (1970) [7] propuseram a seguinte expressão:

$$C_d = C_{d0} - r \frac{U_{dif}^2}{2g\Delta h} \quad (2)$$

Onde  $U_{dif}$ , representa a velocidade de escoamento no interior do difusor imediatamente a montante do orifício e  $\Delta h$  a perda de carga no orifício; os valores de  $C_{d0}$  e  $r$  deverão ser determinados experimentalmente. Para orifícios com boca de saída não arredondada, os coeficientes  $C_{d0}$  e  $r$  tomam os valores de 0.63 e 0.58 respetivamente:

$$C_d = 0.63 + 0.58 \frac{U_{dif}^2}{2g\Delta h} \quad (3)$$

Facilmente se percebe pelas equações do coeficiente de vazão que o processo de resolução das mesmas será iterativo, uma vez que o coeficiente é função da velocidade,  $U_{dif}$ , e da perda de carga  $\Delta h$ .

O cálculo manual é moroso, principalmente se o difusor tiver vários orifícios, pelo que aqui se apresenta o procedimento de uma forma genérica com base no método de cálculo sugerido por Neves [8].



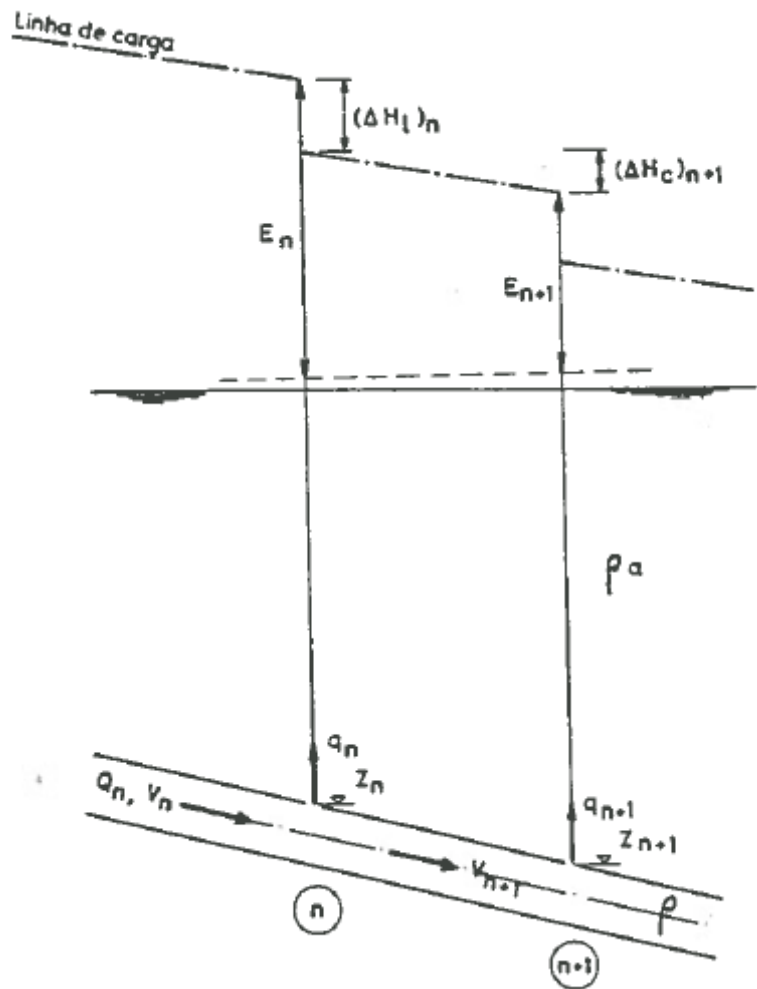


Fig. 4 - Esquema de análise do procedimento de cálculo para dimensionamento de um exutor submarino (Fonte: Neves, 1986).

na Figura 4,

$Q_n$ : caudal escoado no troço n do difusor;

$z_n$ : cota do orifício n;  $z_{n+1}$ : cota do orifício n+1;

$q_n$ : Caudal descarregado no orifício n;

E: carga efetiva (ie, a perda de carga entre o interior e o exterior,  $\Delta h$ )

O procedimento de cálculo é iniciado de jusante para montante, contrariamente ao procedimento corrente.

- i. Arbitra-se o coeficiente de vazão,  $C_d$ , e a perda de carga sobre o primeiro orifício, a contar de jusante para montante,  $\Delta h_1$ ;

$$q_1 = C_d \frac{\pi d_1^2}{4} \sqrt{2g\Delta h_1} \quad (4)$$

- ii. De seguida calcula-se a velocidade no difusor

$$Q_{d,1} = q_1$$

$$U_1 = \frac{Q_1}{\frac{\pi D_{\text{dif}}^2}{4}} \quad (5)$$

iii. Calcula-se a perda de carga total entre o orifício 1 e 2;

$$\Delta H_t = \Delta H_c + \Delta H_L \quad (6)$$

onde:

$\Delta H_t$ : perda de carga total entre orifício n e o orifício n+1 [m]

$\Delta H_c$  – A perda de carga continua entre orifício n e o orifício n+1 [m];

$\Delta H_L$  – A perda de carga localizada entre orifício n e o orifício n+1 [m].

iv. Passa-se ao segundo orifício, calculando carga efetiva sobre o segundo orifício com base no teorema de Bernoulli;

$$\Delta h_2 = \Delta h_1 + \Delta H_t - \left(\frac{\Delta \rho}{\rho}\right) \Delta Z_1 \quad (7)$$

sendo

$\Delta Z_1$ : desnível entre orifício n e o orifício n+1 [m];

$\Delta \rho/\rho$ : diferença relativa dos pesos específicos de águas residuais descarregados e do ambiente:

v. Conhecido  $\Delta h_2$ , calcula-se o coeficiente  $C_d$  para o orifício 2;

vi. Depois calcula-se:

$$q_2 = C_d \frac{\pi d_2^2}{4} \sqrt{2g\Delta h_2}$$

$$Q_{d,2} = q_1 + q_2 \quad (8)$$

$$U_2 = \frac{Q_2}{\frac{\pi D_{\text{dif}}^2}{4}}$$

O procedimento descrito acima repete para montante utilizando as seguintes expressões:

$$C_d = C_d \left( \frac{U_{n-1}^2}{2g\Delta h_n} \right) \quad (9)$$

$$q_n = C_d S_n \sqrt{2g\Delta h_n} \quad (10)$$

$$Q_n = Q_{n-1} + q_n \quad (11)$$

$$U_n = \frac{Q_n}{\frac{\pi D_{dif,n}^2}{4}} \quad (12)$$

$$\Delta H_{t,n} = \Delta H_{c,n-1} + \Delta H_{L,n} \quad (13)$$

$$\Delta h_{n+1} = \Delta h_n + \Delta H_{t,n} - \left( \frac{\Delta \rho}{\rho} \right) \Delta Z_n \quad (14)$$

Quando o somatório dos caudais descarregados calculados por cada orifício iguala o caudal total a descarregar, a expressão seguinte representa o critério de paragem acima mencionado

$$Q_{total} = \sum_{i=1}^n q_n \quad (15)$$

Neves [8] recomenda que se a equação anterior não se verificar, para a nova iteração, a carga efetiva sobre o primeiro orifício deverá ser corrigida da seguinte forma

$$\Delta h_{1,2} = \Delta h_1 \left( \frac{Q_{total}}{\sum q_i} \right)^2 \quad (16)$$

### 3.1.3. CÁLCULO DA DILUIÇÃO INICIAL

Ao longo do trabalho referiu-se que a descarga dos efluentes é realizada através de orifícios que dão origem a jatos turbulentos.

Segundo Monteiro e Sousa, 1998 [6], o comportamento dos jatos turbulentos depende de três tipos de parâmetros que são os seguintes:

1. parâmetros dos jatos: nomeadamente a velocidade inicial do jato, nível de turbulência;
2. parâmetros do meio ambiente, nos quais se incluem as velocidades e direção das correntes, as estratificações;
3. parâmetros geométricos, nomeadamente a forma e dimensão do jato, a sua orientação e o espaçamento entre os jatos;

Dentro dos parâmetros referidos, os geométricos são os mais condicionantes, sendo que a diluição inicial depende da profundidade de descarga, do espaçamento entre os orifícios, do número total dos orifícios e dos diâmetros dos orifícios. Os parâmetros geométricos são facilmente melhorados por um projetista, logo alvo de modelação.

Neste trabalho, a diluição foi estimada com base em expressões resultantes da utilização de técnicas de análise dimensional desenvolvidas por Xiaodong *et al.* (2004) e que contempla exutores cujo ângulo entre a direção da corrente e a normal ao difusor é igual a 90°. Foi ainda desenvolvido e aplicado um modelo matemático cujos fluxogramas são apresentados à medida que são apresentadas as expressões.

Para a estimativa da diluição inicial foram considerados 4 cenários possíveis:

- **Cenário 1:** não existência da corrente marítima e da estratificação densimétrica;
- **Cenário 2:** existência de corrente marítima sem a estratificação densimétrica;
- **Cenário 3:** não existência de corrente marítima com estratificação densimétrica;

- **Cenário 4:** existência de corrente marítima com estratificação densimétrica.

Apresentam-se de seguida as principais metodologias de previsão da diluição inicial em cada cenário considerado.

No **cenário 1**, Xiandong *et al* (I), (2004) [9], consideraram a não existência da corrente marítima e a não estratificação densimétrica, sendo que esta opção é uma atitude conservadora de análise da diluição. A Figura 5 representa a definição dos parâmetros que caracterizam a pluma.

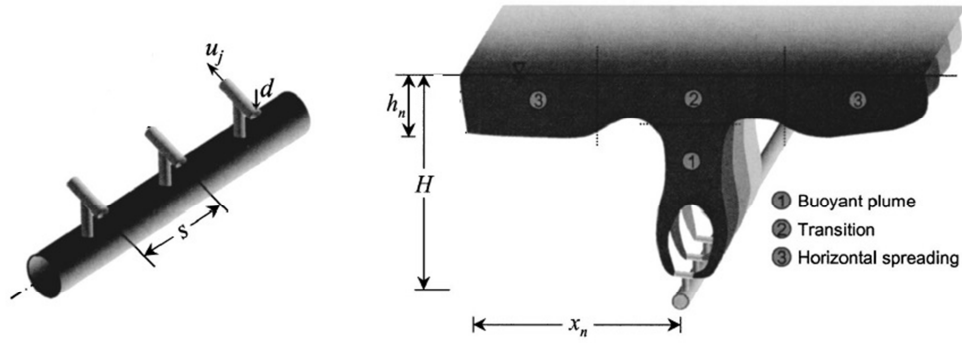


Fig. 5: Definição dos parâmetros da pluma (Extraído de Xiandong et al (I)).  
 $x_n$  é extensão da pluma;  $H$  é a profundidade de descarga;  $h_n$  é a espessura da pluma.

Apresentam-se as expressões que estiveram na base desta abordagem:

Para  $s/H < 1$ , os orifícios estão próximos e os jatos sobrepõem-se, comportando-se como uma descarga através de uma fenda,

$$S_n = \frac{0.49b^{1/3}H}{q} \quad (17)$$

onde,

$S_n$ : representa a diluição mínima [adimensional];

$b$ : impulsão da massa específica [ $m^3/s^3$ ];

$H$ : profundidade de descarga [m];

$s$ : espaçamento dos orifícios ou *risers* [m];

$q$ : caudal por unidade de comprimento do difusor [ $m^2/s$ ].

$$q = \frac{Q_T}{L_D} \quad (18)$$

$$b = g'_0 q \quad (19)$$

$$g'_0 = g \left( \frac{\rho_a - \rho_o}{\rho_a} \right) \quad (20)$$

$$x_n = 0.9H \quad (21)$$

$$h_n = 0.36H \quad (22)$$

sendo:

$Q_T$  : caudal total descarregado;

$x_n$  : extensão da pluma [m];

$h_n$  : espessura da pluma [m].

Para  $s/H > 1$ , os jatos descarregados não interagem entre si e comportam-se como um jato individual

$$S_n = \frac{0.26B^{1/3}H^{5/3}}{Q_j} \quad (23)$$

$$B = g'_0 Q_j \quad (24)$$

$$x_n = 2.8H \quad (25)$$

$$h_n = 0.11H \quad (26)$$

sendo que,

$Q_j$  – é o caudal descarregado por cada jato individualmente [ $\text{m}^3/\text{s}$ ];

$B$  – impulsão pela massa específica [ $\text{m}^3/\text{s}^3$ ].

Apresenta-se na Figura 6 o fluxograma desenvolvido para o primeiro cenário

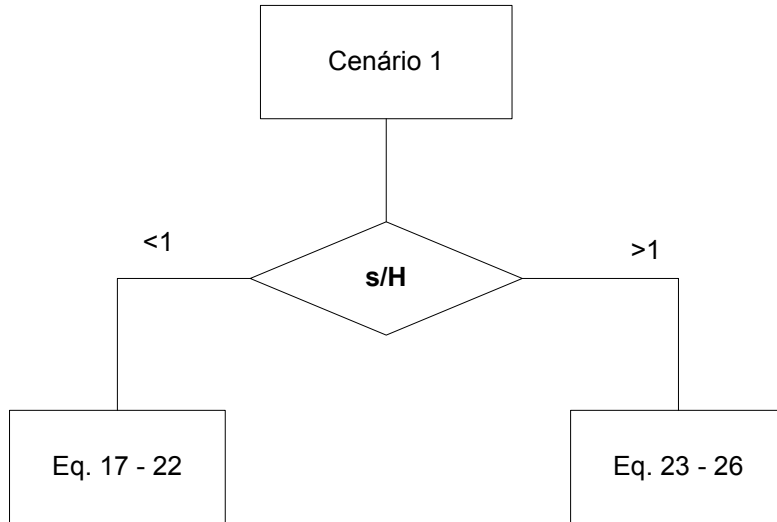


Fig. 6: Fluxograma desenvolvido para estimar a diluição inicial (cenário 1).

No **cenário 2**, Xiandong *et al* (II), 2004 [10], a existência de corrente marítima aumentará a diluição. O efeito dinâmico da corrente marítima é expressa pelo parâmetro  $Fr$  (número de Froude),

$$Fr = \frac{u^3}{b} \quad (27)$$

onde,  $u$  é a velocidade da corrente marítima [ $\text{m/s}$ ].

A definição de parâmetros para estimar a pluma para o caso de houver corrente marítima é representada na fig. 7.

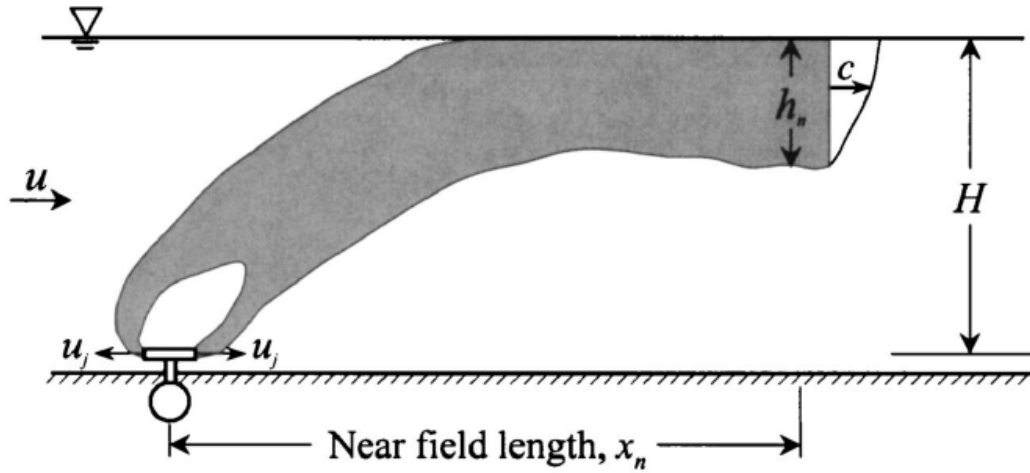


Fig. 7: Definição dos parâmetros da pluma (Extraído de Xiandong et al (II))  
 $x_n$  é extensão da pluma;  $H$  é a profundidade de descarga;  $h_n$  é a espessura da pluma.

Se o número de Froude,  $Fr$ , é inferior a 1,  $Fr < 1$ , o escoamento é dominado pelos efeitos densimétricos uma vez que a corrente é fraca e se  $Fr > 1$ , o escoamento é dominado pela corrente marítima.

Para  $s/H < 1$  e  $Fr > 1$ , a corrente é forte, os orifícios estão próximos, os jatos sobrepõem-se, comportando-se como uma descarga através de uma fenda. As características da pluma são independentes do espaçamento entre os orifícios e apenas em função de  $Fr$ .

$$S_n = \frac{0.49F^{1/3}uH}{q} \quad (28)$$

$$x_n = 2.5F^{1/3}H \quad (29)$$

$$h_n = 0.65F^{1/3}H \quad (30)$$

Se  $s/H < 1$  e  $Fr < 1$ , a corrente é fraca e a pluma pode ser estimada considerando um ambiente estacionário.

$$S_n = \frac{0.6uH}{q} \quad (31)$$

$$x_n = 0.9H \quad (32)$$

$$h_n = 0.36H \quad (33)$$

Se  $s/H > 1$  e  $Fr < 1$ , a corrente é fraca e a pluma pode ser estimada considerando um ambiente estacionário. Nesta situação, as características da pluma são em função do espaçamento entre os orifícios.

$$S_n = \frac{0.26H^{5/3}B^{1/3}}{Q_j} \quad (34)$$

$$x_n = 2.8H \quad (35)$$

$$h_n = 0.11H \quad (36)$$

Se  $s/H > 1$  e  $Fr > 1$ , não há interação entre os jatos e comportam-se como jatos individuais. A diluição é estimada por,

$$S_n = \frac{0.32uH^2}{Q_j} \quad (37)$$

$$x_n = 5.2F^{1/3}H \quad (38)$$

$$h_n = 0.30F^{1/3}H \quad (39)$$

onde  $Q_j$  é o caudal descarregado.

O fluxograma desenvolvido para o cenário 2 é apresentado a seguir:

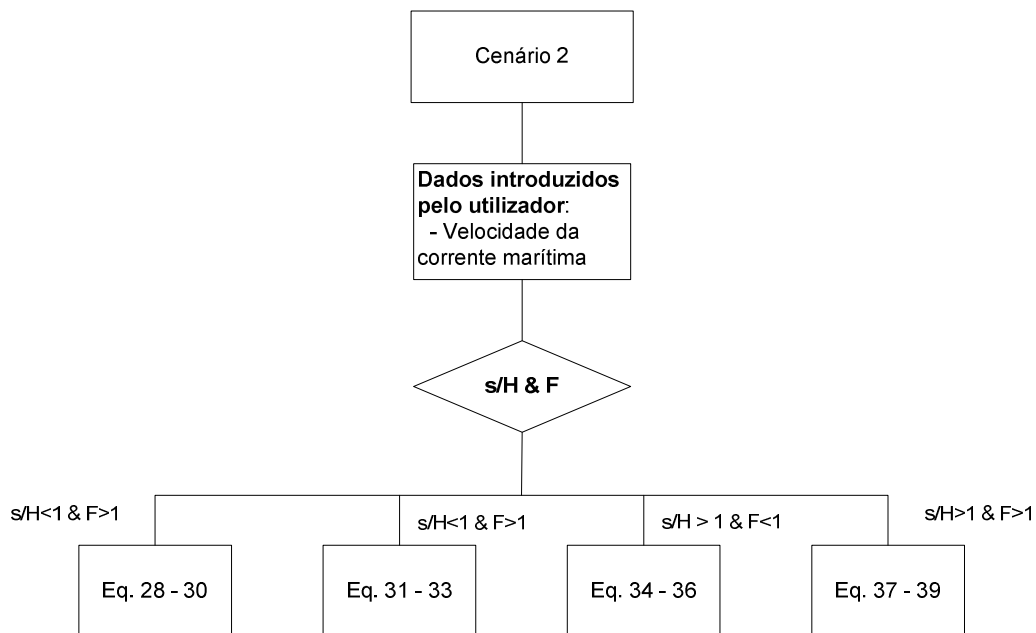


Fig. 8: Fluxograma desenvolvido para estimar a diluição inicial (cenário 2)

No **cenário 3**, Xiandong *et al* (III), 2004 [11], considera-se a existência de estratificação linear que impede a ascensão da pluma até à superfície. Todavia, é preferível que as águas residuais não fiquem submersas, o que provocaria um atraso na mortalidade das bactérias por se reduzir a influência benéfica do sol.

Apresenta-se a seguir um esquema do comportamento da pluma em ambiente estratificado.

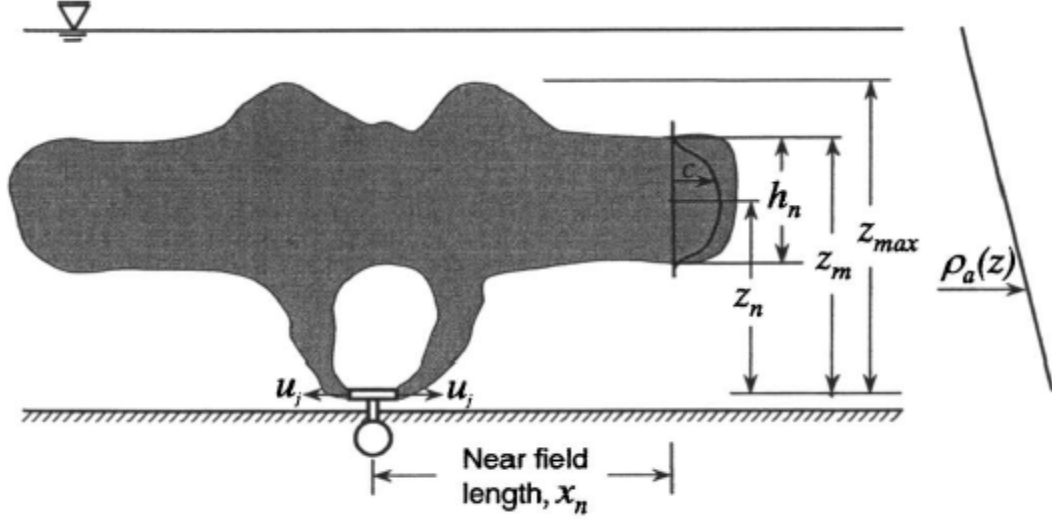


Fig. 9: Definição dos parâmetros da pluma. (Extraído de Xiandong *et al* (III))  
 $x_n$  é extensão da pluma;  $h_n$  é a espessura da pluma;  $z_{max}$  é altura máxima de ascensão da pluma.

A estratificação linear densimétrica do oceano pode ser caracterizada pela frequência de flutuação ou frequência de Brunt – Vaisala:

$$N = \sqrt{-\frac{g}{\rho_a} \frac{d\rho_a}{dz}} \quad (40)$$

Com o parâmetro  $N$  pode-se definir um parâmetro linear dado por  $l_b$ , que representa a escala de comprimentos associada aos efeitos densimétricos e é dado pela seguinte expressão:

$$l_b = \frac{b^{1/3}}{N} \quad (41)$$

Para  $s/l_b < 1$ , os orifícios estão próximos, os jatos interagem entre si, comportando-se como uma descarga através de uma fenda. As expressões que estimam a pluma são independentes do espaçamento entre os orifícios.

$$S_n = 0.86 \frac{b^{2/3}}{qN} \quad (42)$$

$$x_n = 2.3l_b \quad (43)$$

$$h_n = 1.5l_b \quad (44)$$

$$z_n = 1.7l_b \quad (45)$$

$$z_{máx} = 3.2l_b$$



( 46)

Para  $s/l_b > 1$ , os jatos descarregados não interagem entre si e comportam-se como um jato individuais

$$S_n = 0.90 \frac{B^{3/4}}{Q_j N^{5/4}} \quad ( 47)$$

$$x_n = 4.1l_b \quad ( 48)$$

$$h_n = 1.6l_b \quad ( 49)$$

$$z_n = 2.7l_b \quad ( 50)$$

$$z_{máx} = 4.1l_b \quad ( 51)$$

nas expressões acima,

$x_n$  : extensão da pluma [m];

$h_n$  : espessura da pluma [m];

$z_n$  : altura da diluição inicial [m];

$z_{máx}$  :Altura máxima da pluma [m].

O fluxograma desenvolvido para o cenário 3 é apresentado a seguir:

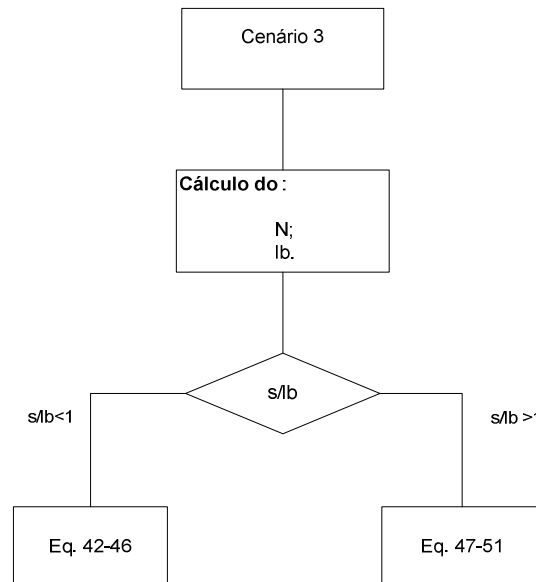


Fig. 10: Fluxograma desenvolvido para estimar a diluição inicial (cenário 3)

No **quarto cenário** Xiandong *et al* (IV) [12], combinou-se o efeito da existência de estratificação como o efeito benéfico da existência da corrente marítima.

Apresenta-se a seguir um esquema do comportamento da pluma nesta situação.

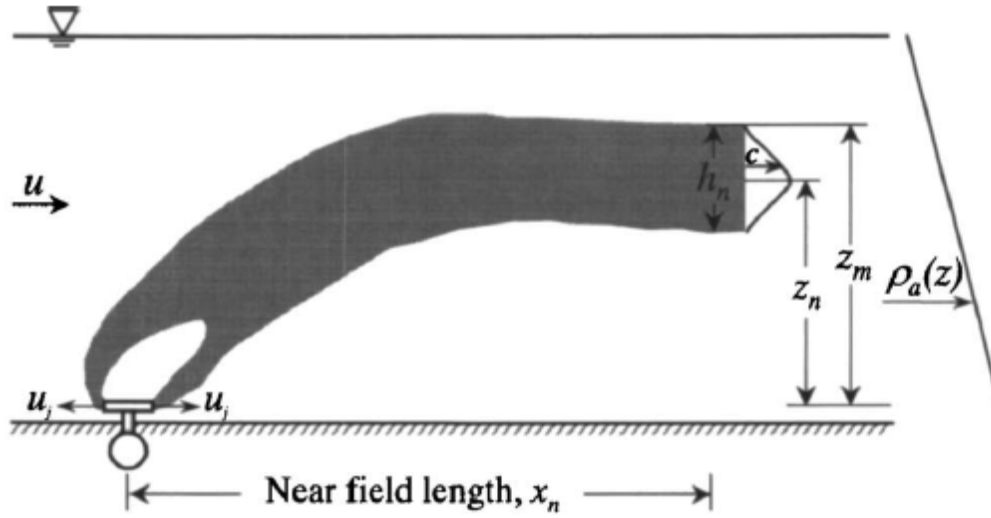


Fig. 11: Definição dos parâmetros da pluma (Extraído de Xiandong et al (III))  
 $x_n$  é extensão da pluma;  $Z_n$  é altura média da pluma;  $Z_{max}$  é altura máxima de ascensão da pluma.

Para  $s/l_b < 1$  e  $F > 1$ , a corrente é forte, os orifícios estão próximos, os jatos interagem entre si, comportando-se como uma descarga através de uma fenda. As características da pluma são independente do espaçamento entre os orifícios e apenas em função de  $Fr$ .

$$S_n = \frac{1.23F^{1/3}b^{2/3}}{qN} \quad (52)$$

$$x_n = 8F^{1/3}l_b \quad (53)$$

$$z_n = 1.4F^{-1/6}l_b \quad (54)$$

$$z_m = 2.4F^{-1/6}l_b \quad (55)$$

Para  $s/l_b > 1$  e  $F > 1$  os jatos descarregados não interagem entre si e comportam-se como jatos individuais.

$$S_n = \frac{1.3u^{1/3}B^{2/3}}{Q_jN^{4/3}} \quad (56)$$

$$x_n = 12 \frac{u}{N} \quad (57)$$

$$z_n = 1.9 \left( \frac{l_a}{l_s} \right)^{2/3} l_s \quad (58)$$

$$z_m = 2.9 \left( \frac{l_a}{l_s} \right)^{2/3} l_s \quad (59)$$

$$l_s = \frac{B}{u^3} \quad (60)$$

$$l_a = \frac{u}{N} \quad (61)$$

O fluxograma desenvolvido para o cenário 4 apresentado a seguir:

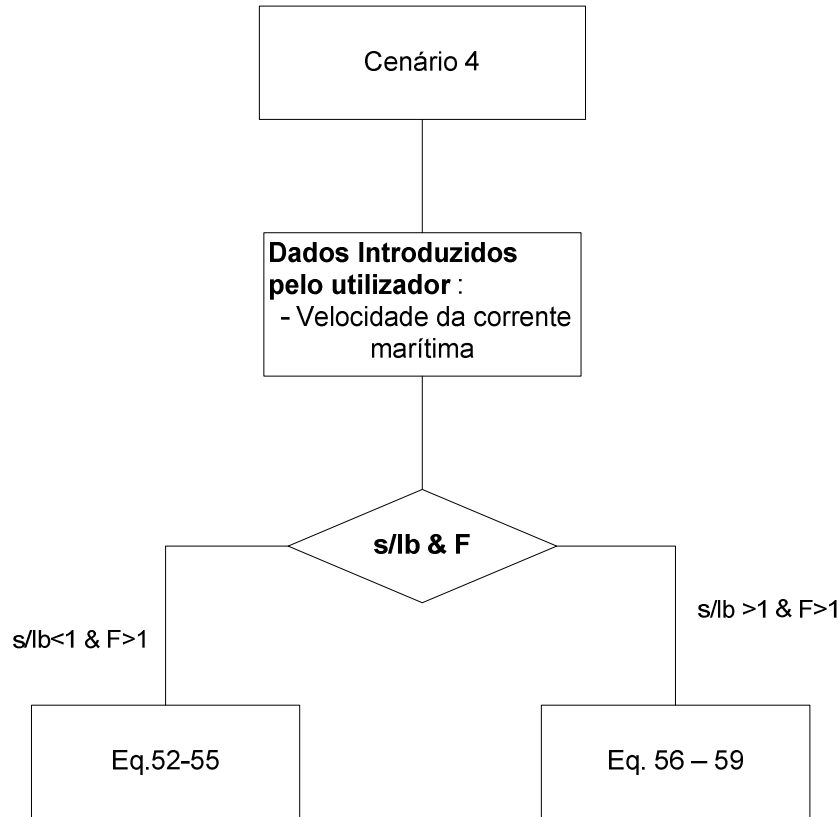


Fig. 12: Fluxograma desenvolvido para estimar a diluição inicial (cenário 4)

### 3.2. TIPOS DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

Vários gamas de materiais foram usados ao longo dos anos na construção dos exutores, desde Ferro Fundido Dúctil (FFD), aço revestido a betão, a poliéster reforçado a fibra de vidro (PRFV).

A partir dos anos 60, começou-se a usar o polietileno de alta densidade (PEAD) que, para além de oferecer boas características mecânicas, tais como: a tensão e módulo de elasticidade, garante um bom comportamento aos esforços provocados pela ação do vento durante o processo de submersão, correntes marítimas e instabilidade do leito submarino. A sua instalação é realizada através da técnica *Float and Sink* que será tratada mais à frente.

Os tubos de PEAD são dimensionados para trabalhar a 20°C durante um período útil de vida de 50 anos e a tensão de cálculo admissível em condutas,  $\sigma_s$ , é dada pela seguinte expressão:

$$\sigma_s = \frac{\sigma_{s,50anos}}{C}$$

onde,

C: coeficiente de segurança;

$\sigma_{s,50 \text{ anos}}$ : resistência mínima requerida ao fim de 50 anos e a 20°C, geralmente representada pela sigla MRS.

O coeficiente de segurança mínima é de 1.25 ou 1.6 dependendo de país para país de acordo com o regulamento nacional em vigor.

Os materiais com resistência mínima requerida (MRS) de 8 MPa e de 10 MPa, a tensão constante durante 50 anos e a 20°C, são denominados de PE80 e PE100 respetivamente.

### 3.3. TÉCNICAS DE INSTALAÇÃO - *FLOAT AND SINK*

Como já foi referido anteriormente, a partir dos anos 60, os países do norte da Europa começaram a utilizar exutores submarinos em PEAD. As condutas eram inicialmente produzidas com comprimento de 12 m e afundadas no mar por um processo onde a água entra numa extremidade e o ar é libertado na outra extremidade. Técnicas mais antigas de instalação tinham deficiências a nível de junção de troços de menor comprimento. Com o aparecimento de condutas PEAD esta deficiência foi ultrapassada com a junção de troços por soldadura topo a topo.

A empresa Pipelife Norge As, especialista em produção de tubos PEAD, recuperou esta técnica e desenvolveu condutas com comprimentos até 500 m e diâmetros a variar entre 50 mm a 1600 mm. O processo de submersão das condutas é garantido pelas forças de gravidade, pressão do ar e da impulsão.

A empresa Pipelife Norge AS disponibiliza um manual [13] para a instalação de exutores submarinos em PEAD. Segundo este catálogo, o processo de submersão é realizado por fases para garantir uma instalação segura, a qual descreve-se a seguir:

1. numa primeira fase, as condutas com um comprimento de 400-600m são transportadas para o estaleiro de montagem por batedores;
2. a seguir, são instalados os anéis de afundamento, que podem ser montados no estaleiro ou no mar, com um espaçamento previamente calculado. Os exutores submarinos em PEAD são dimensionados para conseguirem flutuar com os anéis instalados quando preenchidos por ar no interior da conduta;
3. ao exutor são instaladas flanges cegas em ambas as extremidades, sendo que na extremidade mais externa (do lado do mar) é acoplada uma válvula para controlar a saída de ar;
4. depois de todos os troços estarem montados, inicia-se o processo de submersão onde a rota é delineada através de bóias. A submersão inicia-se com a abertura da referida válvula e a aplicação de uma força de tração. A pressão no interior da conduta é controlada através de um manómetro.
5. ao longo do processo de submersão, a conduta adquire uma configuração em 'S', Figura 13, que expressa o equilíbrio entre as forças ascendentes (impulsão hidrostática no trecho com ar) e descendentes (peso do trecho com água).

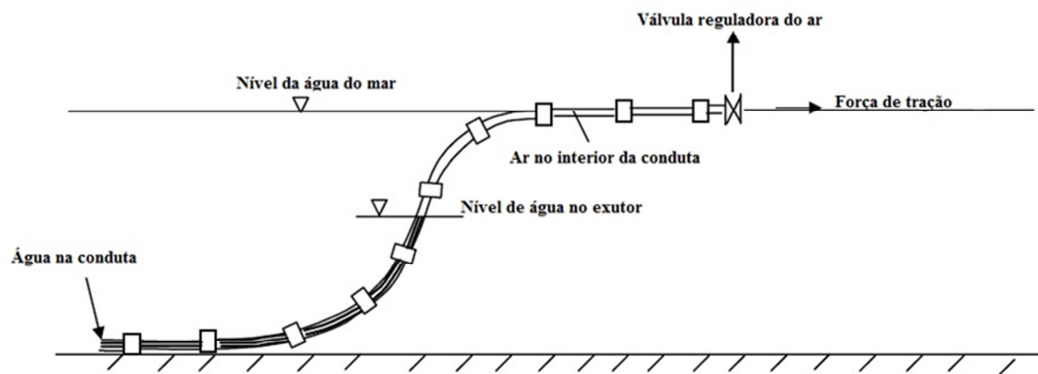


Fig. 13- Float and Sink – Pipelife Norge As



## 4. MODELOS COMPUTACIONAIS

### 4.1. INTRODUÇÃO

Este capítulo pretende responder a seguinte questão: **será possível um programa usado para a modelação de rede de distribuição de água ser capaz de modelar um exutor submarino?** De modo a responder esta pergunta, recorreu-se a um conjunto de artifícios, com base a noção de conceitos hidráulicos adquiridos ao longo do curso.

Serão, ainda, abordados o modo de funcionamento de um programa de cálculo automático, versão beta, usado em obras de engenharia, como por exemplo, no exutor submarino de Buenos Aires (Argentina) – CORHYD. Tendo sido usado em obras de engenharia com alguma importância, considerou-se ser um programa ideal para validar um modelo EPANET desenvolvido pelo autor.

### 4.2. MODELO DE CÁLCULO. SIMULADOR EPANET

EPANET é um programa de domínio público de modelação de sistemas de distribuições de água desenvolvida pela Agência de Proteção do Ambiente dos Estados Unidos (EPA). Permite executar simulações estáticas e dinâmicas do comportamento hidráulico de uma rede de distribuição.

A modelação do exutor, objeto de estudo no presente trabalho, requer a concepção de um modelo. Adotou-se um modelo unidimensional cujas fronteiras são: a montante, a câmara de carga, e a jusante, os orifícios (ou *risers*) do difusor.

A Figura 14 representa-se um esquema do modelo EPANET adotado:

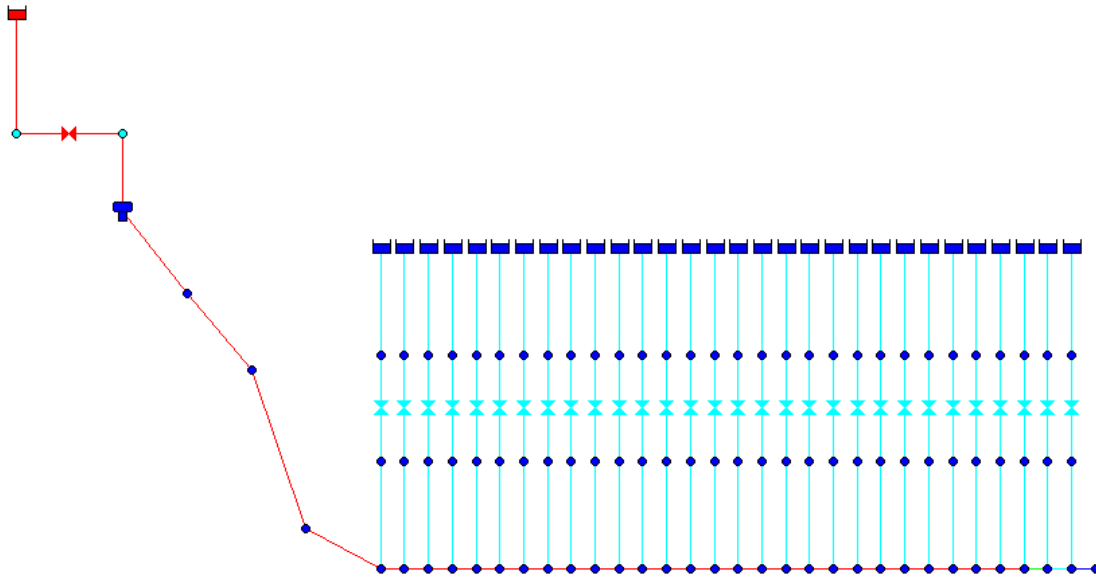


Fig. 14 - Esquema geral do modelo EPANET

Para a modelação da instalação, nomeadamente os orifícios (entende-se por orifícios a seção de saída do jato), recorreu-se a um conjunto de artifícios a seguir que se descrevem e explicam.

Considerou-se a lei de vazão dos orifícios referida no capítulo anterior:

$$Q_o = C_d S_o \sqrt{2g\Delta h} \quad (62)$$

sendo,

$Q_o$ : caudal escoado através do orifício ( $\text{m}^3/\text{s}$ );

$C_d$ : coeficiente, adimensional, de vazão do orifício;

$S_o$ : área da secção do orifício ( $\text{m}^2$ );

$\Delta h$ : perda de carga no orifício (m) (isto é, diferença de carga entre o interior e o exterior do difusor).

No modelo EPANET desenvolvido, considerou-se duas opções de modelação: primeiro, a existência de condutas verticais conhecidos como *risers*; segunda, a existência de orifícios executados na parede do difusor.

A existência de *risers* no exutor submarino foi simulada no EPANET com o auxílio de válvulas do tipo borboleta, igualmente conhecida por TCV (Throttle Control Valve). A válvula TCV está ligada a duas condutas: a primeira (parte inferior), com um comprimento igual à altura do *riser*, sendo que o diâmetro do mesmo corresponde ao diâmetro do *riser*; a segunda conduta tem um diâmetro de 1000 mm e um comprimento de um metro. Este artifício tem como objetivo evitar as perdas de carga. A válvula TCV simula uma válvula parcialmente aberta, cujo coeficiente de perda de carga,  $K_v$ , é o parâmetro a definir.

Voltando à lei de vazão dos orifícios, e resolvendo a equação em ordem à perda de carga no orifício,  $\Delta h$ , obtém-se a seguinte expressão:

$$\Delta h = \frac{1}{C_d^2} \frac{U_o^2}{2g} \quad (63)$$

A partir da expressão anterior define-se o coeficiente de perda de carga da válvula,  $K_v$ .



$$K_V = \frac{1}{C_d^2} \quad (64)$$

Cada *riser* corresponde a uma válvula TCV e está ligada a um reservatório de nível fixo através de uma conduta de pequena extensão e de grande diâmetro, de modo que a perda de carga nesta ligação seja desprezável.

A figura 15 representa um detalhe da modelação de um *riser*.

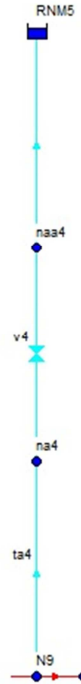


Fig. 15 - Detalhe da modelação de um *riser*

O nível de água nos reservatórios, carga hidráulica, representa a altura de maré considerada na simulação e à qual deu-se o nome de Reservatório de Nível de Maré (RNM). Atendendo que o modelo numérico utilizado considera uma densidade de fluído constante e devido à diferença de densidade entre a água escoada no exutor e a densidade de água do mar, foi necessário introduzir uma correção no nível de água neste reservatório. Recorreu-se à noção de superfície livre fictícia para realizar a referida correção, em que o nível de água nos reservatórios depende da coluna líquida na vertical de cada *riser*. A carga hidráulica nos Reservatórios de Nível de Maré é calculada pela seguinte expressão:

$$H_{R,i} = \frac{\rho_{\text{mar}}}{\rho_{\text{efluente}}} H_{\text{maré}} + Z_{0,i} \left( 1 - \frac{\rho_{\text{mar}}}{\rho_{\text{efluente}}} \right) \quad (65)$$

sendo que:

$H_{R,i}$ : carga hidráulica no reservatório ligado ao orifício  $i$ , em relação ao zero hidrográfico (ZH) [m];

$H_{\text{maré}}$ : altura da maré – altura da água medida em relação ao ZH [m];

$Z_{0,i}$ : Cota do orifício de saída do *riser*, medido em relação ao ZH [m];

$\rho_{\text{mar}}$ : massa volúmica da água do mar [kg/m<sup>3</sup>];

$\rho_{\text{efluente}}$ : massa volúmica do efluente [kg/m<sup>3</sup>].

O coeficiente de vazão foi definido na equação (3). Os resultados da simulação são função de  $(U_{\text{dif}}, \Delta h)$ , sendo que o processo de resolução passa por um processo iterativo.

Para efetuar este processo iterativo, desenvolveu-se e aplicou-se um programa de cálculo automático, **EXUTOR**, cujo código foi escrito no *software* comercial MatLab R2011b desenvolvido pela Mathworks.

Para o desenvolvimento de cálculo utilizou-se a *Toolbox* de comunicação do MatLab com o EPANET desenvolvida por Vieira[14].

A massa volúmica da água do mar depende da temperatura e da salinidade. No programa de cálculo desenvolvido, optou-se por pedir ao utilizador a temperatura de água do mar e depois calcular a massa volúmica de água do mar de acordo com a equação da UNESCO [15].

$$\begin{aligned}\rho_0 = & 999.842594 + 6.793952 \times 10^{-2}T - 9.095290 \times 10^{-3}T^2 \\ & + 1.001685 \times 10^{-4}T^3 - 1.120083 \times 10^{-6}T^4 \\ & + 6.536332 \times 10^{-9}T^5.\end{aligned}\quad (66)$$

$$\begin{aligned}\rho_{\text{mar}} = & \rho_0 + (8.24493 \times 10^{-1} - 4.0899 \times 10^{-3}T + 7.6468 \\ & \times 10^{-5}T^2 - 8.2467 \times 10^{-7}T^3 + 5.3875 \\ & \times 10^{-9}T^4)S \\ & + (-5.72466 \times 10^{-3} + 1.0227 \times 10^{-4}T \\ & - 1.654610^{-6}T^2)S^{3/2} + 4.831410^{-4}S^2\end{aligned}\quad (67)$$

$T$  – Temperatura da água do mar [ $^{\circ}\text{C}$ ];

$S$  – Salinidade da água do mar [Psu].

A simulação de um orifício é análoga à do *riser*, salvo um pormenor: à conduta que liga o nó do difusor à válvula TCV é atribuída uma pequena extensão e um grande diâmetro. O programa de cálculo desenvolvido introduz automaticamente uma extensão de 1 m e um diâmetro de 1000 mm. Esta opção garante que, na eventualidade de o utilizador introduzir dados errados, por engano ou de forma propositada, não ocorra perda de carga na conduta vertical, conduzindo a resultados erróneos.

Em relação ao difusor, o programa desenvolvido calcula os caudais descarregados por cada orifício e a diluição inicial é calculada com base no exposto na secção 3.1.3. O modo de funcionamento está representado nas Figuras 16 a 20.

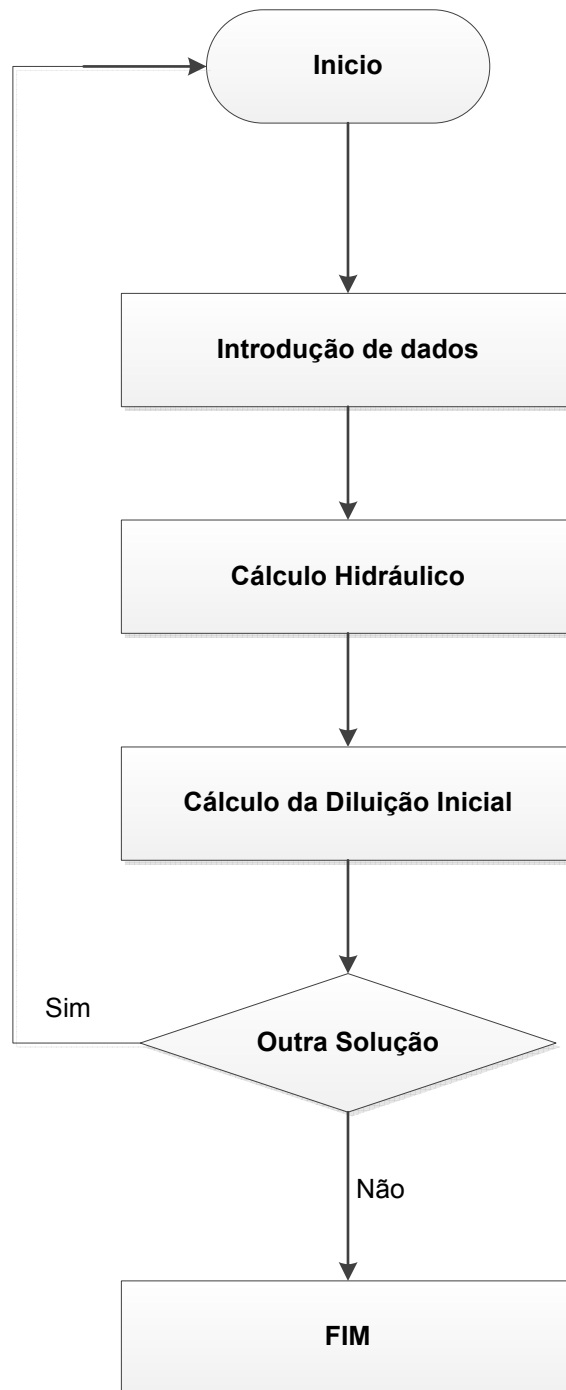


Fig. 16 - Fluxograma geral do programa EXUTOR

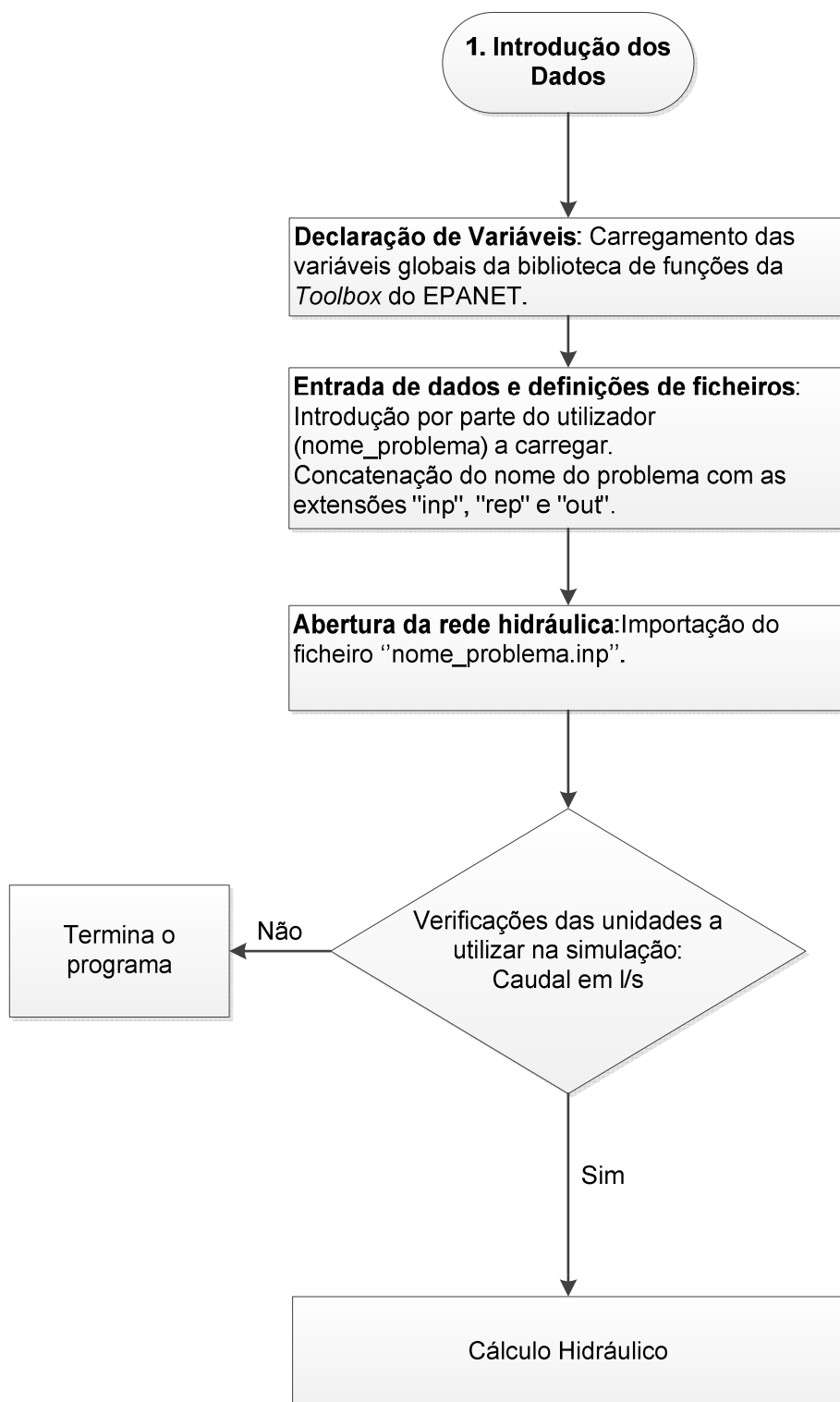


Fig. 17 - Fluxograma de entrada de dados

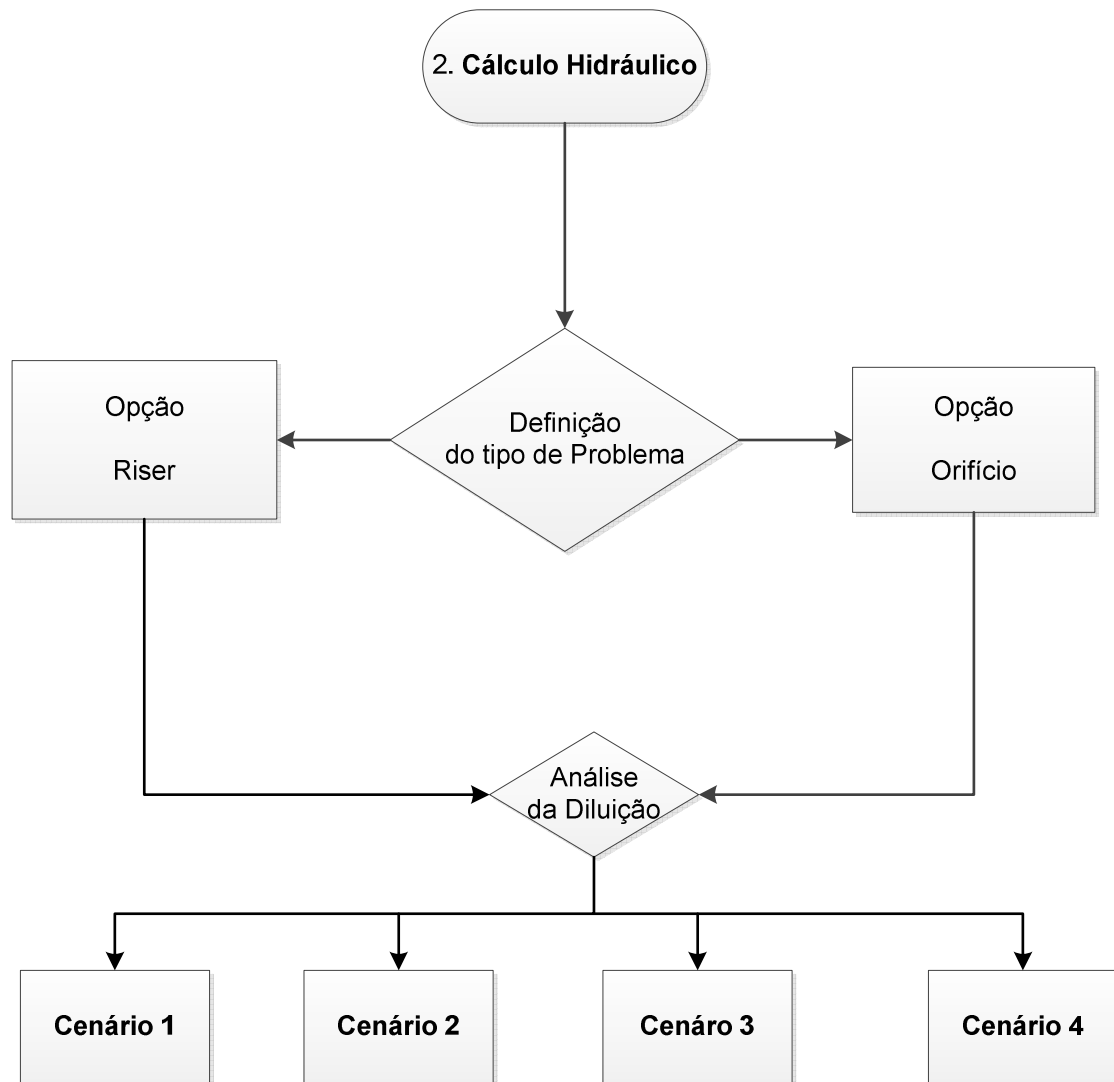


Fig. 18 - Fluxograma de cálculo hidráulico

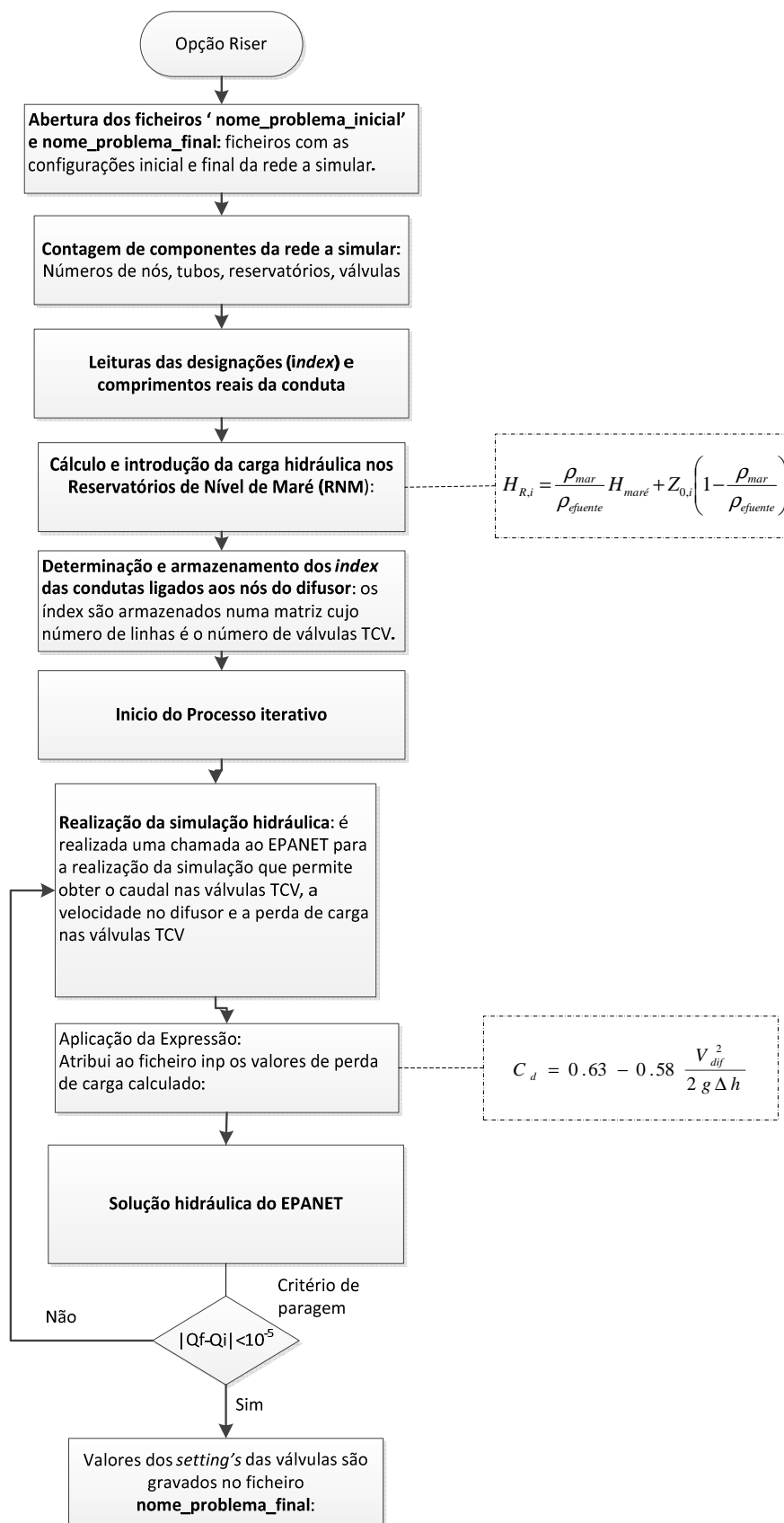


Fig. 19 -Fluxograma para a opção Rise

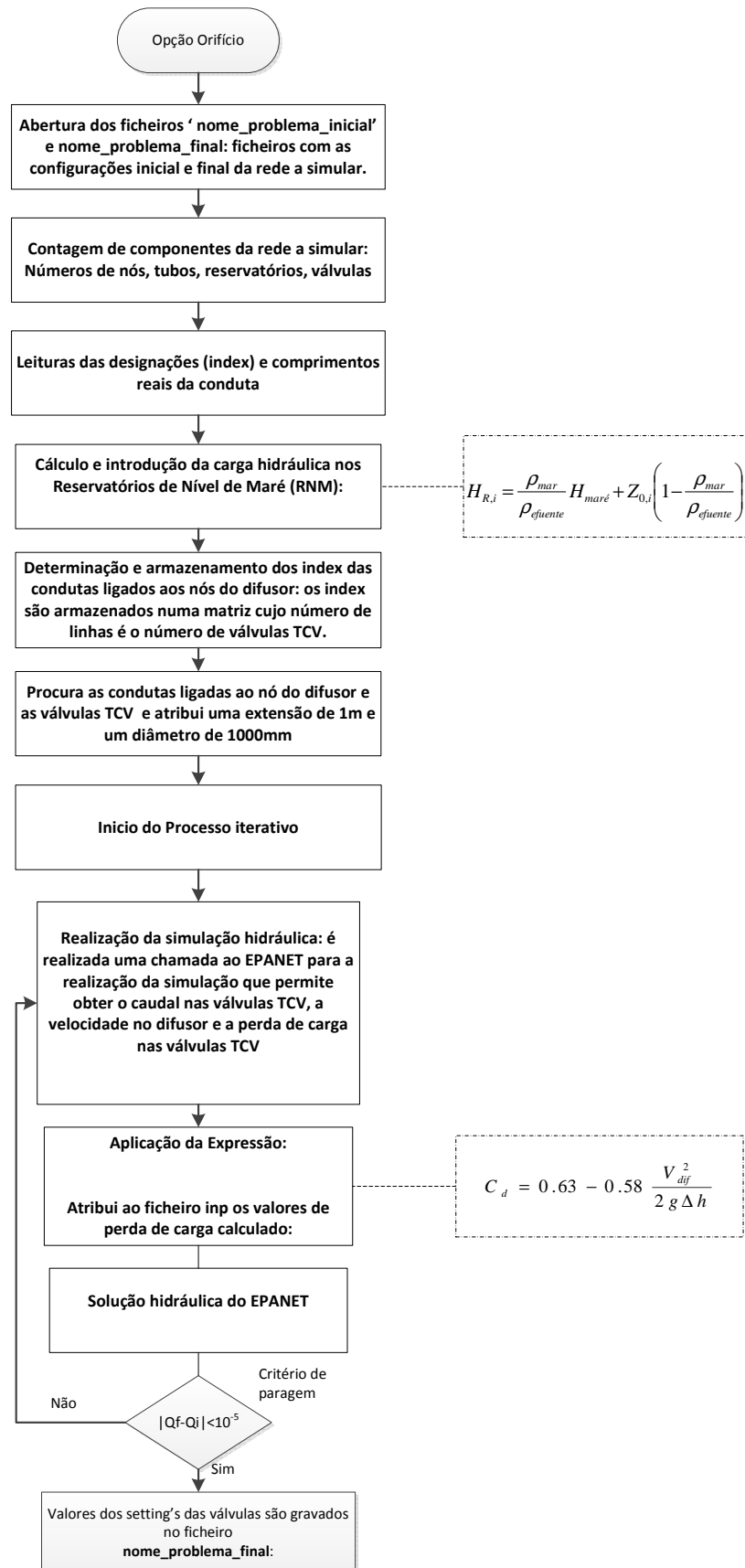


Fig. 20 -Fluxograma para a opção orifício

### 4.3. CORHYD

O CORHYD é um programa destinado ao cálculo das características hidráulicas do escoamento em exutores submarinos. É um código escrito no *software* MatLab e inclui uma interface gráfica. Os autores são: Bleninger e Jirka [1].

Segundo os autores[1], este programa é destinado aos projetistas e aos operadores de controlo de descarga para modelar, analisar, prever e controlar o comportamento da descarga dos difusores sob diferentes condições de descarga.

#### 4.3.1. MODELO DE CÁLCULO

O modelo de cálculo assumido pelo CORHYD é uma análise **orifício a orifício** ou **riser a riser**. Os cálculos são baseados na aplicação da equação da continuidade e do teorema de Bernoulli. A partir do esquema de análise proposto por Bleninger e Jirka [16], Figura 21, faz-se uma referência do procedimento de cálculo usado no programa CORHYD.

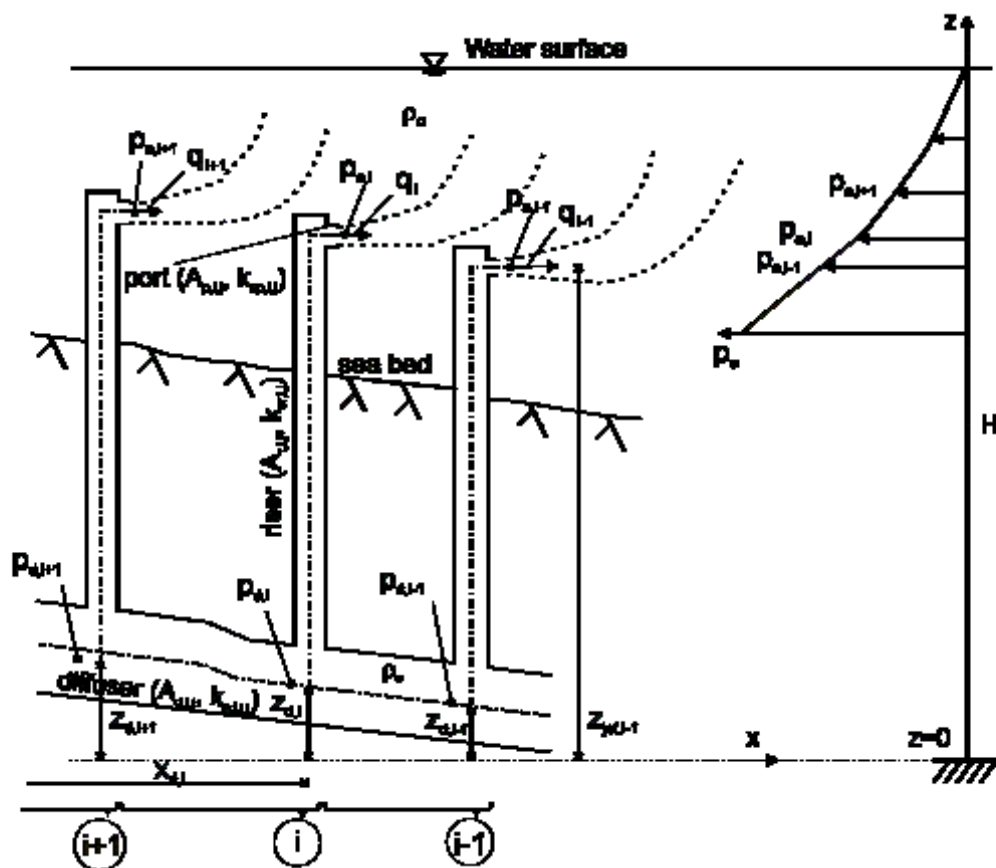


Fig. 21 - Esquema de análise orifício a orifício:  $p_{a,i}$  = Pressão ambiente,  $q_i$  = descarga no orifício  $i$ ,  $p_{d,i}$  = pressão no interior do difusor imediatamente a montante do *riser*,  $Z_{di}$  = distância do eixo do difusor ao plano de referência,  $H$  = distância do nível do mar.

Fonte: Manual CORYHD

- i. Aplicação do teorema de Bernoulli entre a secção (i) e a secção (i-1),



$$p_{d,i} = p_{d,i-1} + \rho_{\text{efluente}} g (Z_{d,i-1} - Z_{d,i}) + \frac{\rho_{\text{efluente}}}{2A_{d,i}^2} \left( \sum_{k=1}^{i-1} q_k \right)^2 - \frac{\rho_{\text{efluente}}}{2A_{d,i}^2} \left( \sum_{k=1}^1 q_k \right)^2 + \Delta H_{d,i} \quad (68)$$

$$\Delta H_{d,i} = \frac{\rho_{\text{efluente}}}{2} \left( \sum_{k=1}^{i-1} q_k \right)^2 \left[ \sum_{j=1}^{n_{d,i-1}} \frac{1}{A_{d,i-1,j}^2} \left( k_{d,i-1,j} + \lambda_{d,i-1,j} \frac{L_{d,i-1,j}}{D_{d,i-1,j}} \right) \right] \quad (69)$$

ii. Teorema de Bernoulli entre a secção i e a secção de saída do jato.

$$p_{d,i} = p_{a,i} + \rho_{\text{efluente}} g (z_{\text{jet},i} - z_{d,i}) + \frac{\rho_{\text{efluente}}}{2(C_{c,i} A_{p,i})^2} (\alpha_i q_i)^2 - \frac{\rho_{\text{efluente}}}{2A_{d,i}^2} \left( \sum_{k=1}^i q_k \right)^2 + \Delta H_{d,i} \quad (70)$$

$$\Delta H_{d,i} = \frac{\rho_{\text{efluente}} q_i^2}{2} \left[ \sum_{j=1}^{n_{p,i}} \left( \frac{\alpha_i}{A_{p,i,j}} \right)^2 \left( k_{p,i,j} + \frac{\lambda_{p,i,j} L_{p,i,j}}{D_{p,i,j}} \right) + \sum_{j=1}^{n_{r,i}} \left( \frac{1}{A_{r,i,j}} \right)^2 \left( k_{r,i,j} + \frac{\lambda_{r,i,j} L_{r,i,j}}{D_{r,i,j}} \right) \right] \quad (71)$$

O CORHYD, para situações em que o difusor possui *riser*, considera no máximo quatro (4) orifícios de saída por *riser* (entende-se como orifícios à secção de saída do jato). O caudal descarregado pelo jacto é dado por:

$$q_{\text{jet},i} = \alpha_i q_i \quad (72)$$

sendo que  $\alpha_i = 1/n$  (número de orifícios de saída por cada *riser*).

O coeficiente de contração do jato,  $C_c$ , é utilizado para reduzir a secção de saída do jato, aumentando assim a velocidade

Igualando as equações (73) e (74) obtém-se o caudal descarregado por cada *riser*

$$q_i = \sqrt{\frac{\frac{2}{\rho_e} (p_{d,i-1} - p_{a,1}) + 2g(Z_{d,i-1} - Z_{\text{jet},i}) + \left( \sum_{k=1}^{i-1} q_k \right)^2 \left[ \frac{1}{A_{d,i,j}^2} \sum_{j=1}^{n_{d,i-1}} \frac{1}{A_{d,i-1,j}^2} \left( \zeta_{d,i-1,j} + \lambda_{d,i-1,j} \frac{L_{d,i-1,j}}{D_{d,i-1,j}} \right) \right]}{\frac{\alpha_i^2}{(C_{c,i} A_{p,i})^2} + \sum_{j=1}^{n_{p,i}} \left( \frac{\alpha_i}{A_{p,i,j}} \right)^2 \left( \zeta_{p,i,j} + \frac{\lambda_{p,i,j} L_{p,i,j}}{D_{p,i,j}} \right) + \sum_{j=1}^{n_{r,i}} \left( \frac{1}{A_{r,i,j}} \right)^2 \left( \zeta_{r,i,j} + \frac{\lambda_{r,i,j} L_{r,i,j}}{D_{r,i,j}} \right)}} \quad (75)$$

Para as situações onde são executados orifícios na parede do difusor, o caudal descarregado por cada orifício é dado pela seguinte expressão:

$$q_i = \sqrt{\frac{2}{\rho_e} (p_{d,i-1} - p_{a,1}) + \left( \sum_{k=1}^{i-1} q_k \right)^2 \left[ \frac{1}{A_{d,i-1}^2} \sum_{j=1}^{n_{d,i-1}} \frac{1}{A_{d,i-1,j}^2} \left( \zeta_{d,i-1,j} + \lambda_{d,i-1,j} \frac{L_{d,i-1,j}}{D_{d,i-1,j}} \right) \right]} \quad (76)$$

O coeficiente de descarga terá o seguinte aspeto:

$$C_{d,i} = 0.63 - \frac{0.58}{2g} \left( \left( \sum_{k=1}^{i-1} q_k \right)^2 \left[ \frac{1}{A_{d,i-1}^2} \left( \frac{2}{\rho_e} (p_{d,i-1} - p_{a,1}) + \left( \sum_{k=1}^{i-1} q_k \right)^2 \frac{1}{A_{d,i-1,j}^2} \right)^{-1} \right] \right)$$

De modo a evitar que ocorra um processo iterativo, os autores do programa utilizaram a equação de Swanne-Jain, como aproximação a fórmula de Colebrook-White para calcular o coeficiente de atrito,  $\lambda_{d,i}$

$$\lambda_{d,i} = \frac{0.25}{\left[ \log \left( \frac{k_s}{3.7D} + \frac{5.74}{R_e^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (77)$$

Nas expressões acima:

$p_{a,i}$  : pressão ambiente [Pa];

$p_{d,i}$  : pressão no interior do difusor imediatamente à montante do *riser* [Pa];

$Z_{d,i}$  : distância do eixo do difusor ao plano de referência [m];

$q_k$  : caudal escoado entre a secção (i) e a secção (i-1) [m<sup>3</sup>/s];

$q_i$  : caudal descarregado no orifício i [m<sup>3</sup>/s];

$k_{d,i-1}$  : coeficiente de perda de carga localizada entre o troço i e o troço i-1;

$\lambda_{d,i}$  : coeficiente de atrito;

$k_s$  : rugosidade das paredes [m];

D : Diâmetro do exutor

$R_e$  : número de Reynolds.

#### 4.3.2. HIPÓTESES DE CÁLCULO ASSUMIDAS PELOS AUTORES

Os autores do programa CORHYD assumiram um conjunto de hipóteses de cálculo na implementação do modelo, pelo que se descreve aqui:

- o programa calcula as perdas de carga contínuas, devido ao atrito nas paredes da conduta, e contém funções que calculam automaticamente as perdas de carga localizadas consoante a geometria da instalação definida pelo utilizador. Para configurações especiais, permite ainda que o utilizador introduza as perdas de carga localizadas manualmente;
- o CORHYD assume automaticamente um coeficiente de perda de carga de 0.5 m na saída da câmara de carga.
- o programa considera as seguintes perdas de carga no difusor: mudança de diâmetro; entrada dos *risers* e à saída dos *riser*.

As perdas de cargas localizadas consideradas no programa estão representadas na Figura 22:

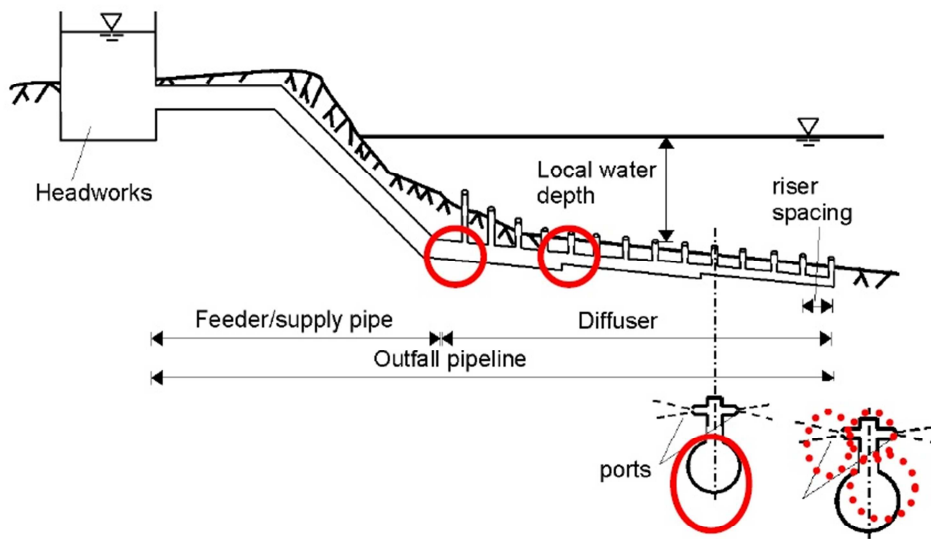


Fig. 22: Perdas de carga localizadas no difusor

#### 4.3.3. DADOS DE ENTRADA

Para a introdução de dados será preciso conhecer o sistema de coordenadas definidas pelos autores. A Figura 23 a seguir representa esse sistema de coordenadas:

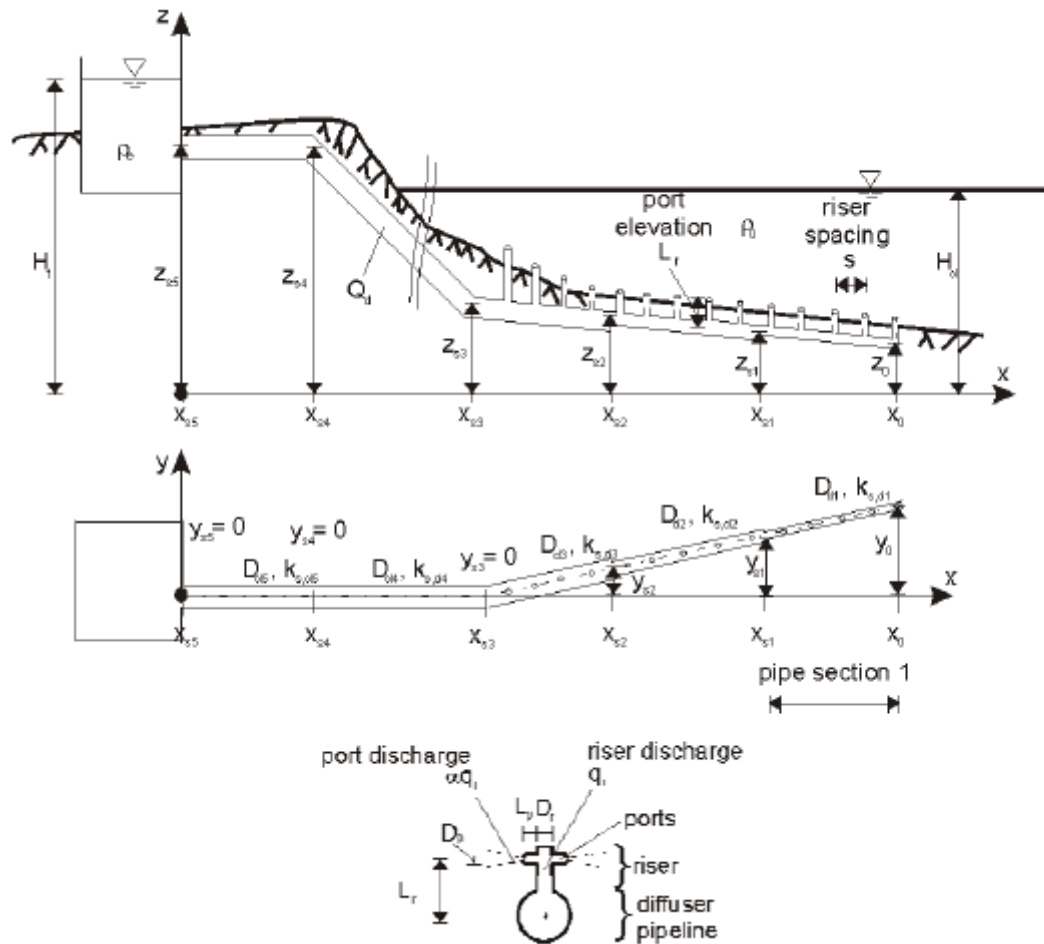


Fig. 23 - Sistema de coordenadas utilizados pelos autores do CORHYD  
Fonte: Manual CORYHD

Na Figura 24 representa-se a interface gráfica do programa CORHYD.

**Ambient Data**

Design Water Level (Hd)  m  
 Density (rho\_0)  kg/m³

**Effluent Data**

Density of effluent (rho\_e)  kg/m³  
 Viscosity (mu)  10<sup>-6</sup> m²/s  
 Design Flow Rate (Qd)  m³/s

**Diffuser/Feeder Pipe Configuration**

Total number of pipe sections (Nd)  [ ]

x-coordinate of centerline at end point (x0)  m  
 y-coordinate of centerline at end point (y0)  m  
 z-coordinate of centerline at end point (z0)  m

**Feeder / Diffuser pipe geometries per section**

Diffuser section #	1	2	3	4	5	6
x-coordinate of vertexline at section start (x)	[m] 3990	3960	3940	3920	3900	3800
y-coordinate of vertexline at section start (y)	[m] 10	10	10	10	10	10
z-coordinate of vertexline at section start (z)	[m] 0	0	0	0	0	0
Pipe Diameter (D)	[m] 1.5	1.55	1.6	1.6	1.65	1.70
Roughness (Ksd)	[m] 0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
Radius of bend at start of section (R0)	[m] 1	1	1	1	1	1
Angle of gradual change (beta)	[°] 90	90	90	90	90	90

**Port/Riser group configurations**

Number of different port / riser groups (Ng)  [ ]

	1	2	3	4	5
Group Number (counting from the end)	[ ] 4	4	4	4	4
Number of riser per group (Nrg)	[ ] 1	2	3	4	5
Located in Y-axis (ft) (Ssn)	[m] 2	1	1	1	1
Distance of first riser from vertex (Lr,g)	[m] 5	5	5	5	5
Space between risers (space,g)	[m] 4	4	3.5	3	3
Riser length (Lr,g)	[m] 0.25	0.25	0.3	0.3	0.3
Diameter of riser (Dr,g)	[m] 0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
Roughness of riser (Ksd,r,g)	[ ] 2	2	1	1	1
Number of openings (ports per riser) (Np,g)	[ ] 3	3	3	3	3
Length of port (Lp,g)	[m] 0.2	0.2	0.25	0.25	0.25
Individual port opening diameter (Dp,g)	[m] 0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002

Additional Local Losses

Fig. 24 - Interface gráfica do programa CORHYD.  
 Fonte: Manual CORYHD

Os dados de entrada são introduzidos através de uma interface a qual se descreve a seguir:

- *Ambient Data* - são introduzidos o nível médio de água do mar e a massa volúmica de água do mar;
- *Effluent Data* – são introduzidos as características do efluente a descarregar, nomeadamente a viscosidade e a densidade. Permite a introdução do caudal a descarregar ou a altura máxima disponível na câmara de carga;
- *Feeder/ diffuser pipe geometries per section* – são introduzidos as configurações geométricas do difusor, tanto em planta como em perfil. O CORHYD divide o difusor em várias secções. As secções não são nada mais do que troços do difusor onde há mudança de diâmetro, de rugosidade e de curva em planta.
- *Port/ Riser group configurations* – São definidos as características dos orifícios e/ou riser, tais como: a rugosidade dos riser, diâmetro dos orifícios/riser, comprimento dos riser, número de orifícios por cada riser. Os orifícios/riser são definidos por grupos, onde cada grupo contém n orifícios/ riser igualmente espaçados;
- *Additional local losses* – como já foi anteriormente referido, O CORHYD permite a introdução manual das perdas de cargas localizadas se assim o utilizador desejar.

- *Blocked ports* - é uma parte do programa que permite que o utilizador feche os orifícios/*riser*, simulando, por exemplo, uma situação onde os orifícios/*riser* estão temporariamente fechados ( por exemplo, no início de exploração do sistema).

#### 4.3.4. RESULTADOS

Antes de executar o programa, é dado ao utilizador a possibilidade de escolher o formato de saída dos resultados. O formato de saída inclui: um ficheiro de texto em formato 'txt', um gráfico com as linhas de energia e um gráfico de barras, representando a velocidade no difusor, velocidade e a descarga em cada orifício/*riser*.

# 5.

## CASO DE ESTUDO

### 5.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo pretende-se aplicar e avaliar o modelo EPANET + MatLab desenvolvido neste trabalho. Após a descrição do caso de estudo, passa-se à análise e comparação dos resultados

### 5.2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O caso de estudo é um exemplo académico de um exutor submarino situado na costa portuguesa. A instalação hidráulica é constituída por 3 componentes: câmara de carga, emissário e difusor.

#### 5.2.1. CÂMARA DE CARGA

A câmara de carga apresenta uma secção transversal retangular com cerca de  $7.5 \text{ m}^2$  de área e 15 m de altura até à face inferior da laje do teto, compreendida entre as cotas -2 m (ZH) e +13 m (ZH). Limitou-se a cota máxima da câmara de Carga a +11 m (ZH), permitindo assim uma folga de 2 m até a face inferior da laje do teto.

#### 5.2.2. EMISSÁRIO

O emissário, em PEAD, é apoiado diretamente no fundo do mar através de anéis de afundamento. Tem um comprimento de **3045 m**

#### 5.2.3. DIFUSOR

O difusor tem um comprimento de **350 m**, dividindo-se em dois trechos: o primeiro trecho tem um comprimento de **300 m** e diâmetro nominal de **1600 mm**, o segundo trecho tem um comprimento de **50 m** e diâmetro nominal de **1200 mm**. O difusor tem uma inclinação igual a 2.75% e é constituído por orifícios ou *risers* espaçados de **5 m**, o que implica 70 orifícios ou *risers* distribuídos ao longo do difusor.

### 5.3. SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS DE EXPLORAÇÃO

#### 5.3.1. CENÁRIOS DE EXPLORAÇÃO

Neste trabalho efetuaram-se dois conjuntos de simulações: o primeiro, envolvendo orifícios executados na parede do difusor; o segundo, envolvendo os *riser* com **1.5 m** de altura.

Os dois conjuntos de simulações foram efetuados pelo programa de cálculo desenvolvido neste trabalho, EXUTOR, e o programa CORHYD.

Admitiram-se as seguintes alturas de maré:

- Altura para Preia-mar: 3.7 m (ZH);
- Altura para Baixa-mar: 0.3 (ZH).

Em cada conjunto de simulações estudaram-se 3 cenários correspondentes a afluências combinadas com alturas de maré. Supõe-se que o caudal a descarregar varia entre os valores de 850 l/s e 1200 l/s.

**Cenário A.1:** orifícios com diâmetro de saída, **d=175mm**, em regime de caudal mínimo e altura de maré em Preia-mar. Este cenário é crítico uma vez que, com caudal mínimo e altura de maré em Preia-mar, as velocidades são baixas o que pode conduzir a intrusão salina, entrada de água do mar no exutor;

**Cenário A.2:** com a mesma configuração, **d=175mm**, regime de caudal máximo; e altura da maré em Preia-mar. Este cenário é o mais desfavorável em termos de escoamento, porque exige um nível de água mais elevado na câmara de carga

**Cenário A.3:** a mesma configuração, **d=175mm**, regime de caudal máximo e altura de maré em Baixa- mar. Este é um cenário desfavorável para a diluição na medida que, as velocidades no difusor são maiores e a altura da maré baixa.

### 5.4. MODELAÇÃO EM EPANET

A câmara de carga referida anteriormente é modelada no simulador EPANET como um reservatório de nível variável. A alimentação desse órgão é realizada através de uma válvula reguladora de caudal e programada de acordo com os valores de cada cenário simulado.

No modelo EPANET foram considerados os seguintes parâmetros hidráulicos: o diâmetro interior da tubagem, a rugosidade e a viscosidade cinemática. Chama-se atenção pelo facto dos parâmetros hidráulicos referidos serem grandezas passíveis de ajustamento durante a modelação. Cada um desses parâmetros foi tratado do seguinte modo:

- Diâmetro interior do exutor e do difusor - considerou-se tanto para o exutor como para o difusor as condutas em PEAD, com classe de pressão PN4 e diâmetros DN1600 e DN1200, a que correspondem os diâmetros interiores de 1477 mm e 1108 mm respetivamente.
- Rugosidade – considerou-se uma rugosidade,  $k=1\text{mm}$ , tanto para as condutas do difusor como para os *riser*. Trata-se de uma atitude prudente, uma vez que a rugosidade de um PEAD é por volta de 0.5 mm e prevê-se que ao longo do tempo de serviço do exutor a rugosidade sofra um aumento.



- Viscosidade – A viscosidade cinemática de água depende da temperatura. A expressão que relaciona a viscosidade dinâmica com a temperatura é dada pela fórmula de POISEUILLE [17]:

$$\mu = \frac{1.78}{1 + 0.0337T + 0.000221T^2} \quad (78)$$

sendo T a temperatura expressa em graus celsius. A viscosidade cinemática,  $\nu$ , obtém-se dividindo  $\mu$  pela massa volúmica

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (79)$$

Para o caso de estudo considerou-se que a temperatura do efluente é igual a 10°C, o que corresponde a uma viscosidade de  $1.31 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ . É uma atitude conservadora uma vez que a viscosidade diminui com o aumento da temperatura.

#### 5.4.1. PERDA DE CARGA LOCALIZADA

A uma mudança de diâmetro ao longo do difusor, dá lugar a uma perda de carga localizada. Após consulta de bibliografia da especialidade [18], obteve-se o seguinte coeficiente de perda de carga localizada:

- Transição do diâmetro DN1600 a DN1200 :  $K_{loc}=0.0588$ ;

Considerou-se que, na transição entre a câmara de carga e o emissário existe uma perda de carga localizada e cujo coeficiente é igual a  $K_{loc}= 0.5$ .

A resolução numérica do modelo foi realizada com o simulador EPANET (figura 25). A quantificação das perdas de cargas contínuas foi efetuada com a fórmula de Darcy-Weisbach, com o coeficiente de resistência calculado pela aproximação explícita de Swamee-Jain à fórmula de Colebrook-White.

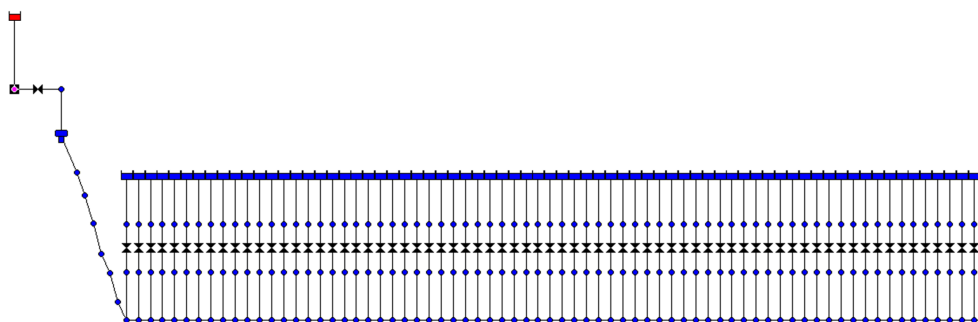


Fig. 25 -Esquema de modelação do caso de estudo em EPANET

A duração da simulação foi de duas horas com o intuito de estabilizar o modelo. Teve-se, ainda, a preocupação de ajustar o nível inicial da água na câmara de carga de modo que no final do período da simulação o nível final seja idêntico.

### 5.4.2. CALIBRAÇÃO DO MODELO

Após uma primeira simulação do modelo em EPANET para o primeiro cenário, observou-se que devido à inclinação do exutor, a carga hidráulica no mar é maior do que no interior do exutor, conduzindo a uma entrada de água do mar nos orifícios a maior profundidade e à descarga de maiores caudais nos orifícios da zona de montante, a menor profundidade. Esta situação deve-se à diferença de densidade dos líquidos e das velocidades baixas à saída do jato.

Face a esta situação, tomaram-se duas medidas: primeiro, reduzir o diâmetro de saída para 125 mm, aumentando a velocidade de saída do jato; segundo, fechar as válvulas, simulando orifícios tamponados. O critério do fecho das válvulas teve como objetivo proporcionar uma descarga uniforme e impor uma velocidade mínima de 1.2 m/s no cenário A1.

Após a aplicação dessas medidas, chegou-se ao número máximo de orifícios abertos de 37, o que corresponde a ter 33 orifícios fechados.

### 5.5. MODELAÇÃO EM CORHYD

A modelação com o programa CORHYD corresponde a introdução dos dados na interface gráfica. Apresenta-se um exemplo da introdução dos dados na interface.

The screenshot displays the CORHYD software interface with the following sections and data:

- Ambient Data Input:**
  - Water level elevation (Hd): 2.0 m
  - Density (rho\_0): 1026 kg/m³
- Effluent Data Input:**
  - Density of effluent (rho\_e): 1000 kg/m³
  - Viscosity (ny): 1.31 10<sup>-6</sup> m²/s
  - Flow Rate Qd: 1 m³/s (selected)
  - Total Head: 1 m²/s
- Diffuser/Feeder Pipe Configuration:**
  - Total number of pipe sections (Nd): 2 [-]
  - x-coordinate of pipe centerline at seaward end (x0): 3378 m
  - y-coordinate of pipe centerline at seaward end (y0): 0 m
  - z-coordinate of pipe centerline at seaward end (z0): -22.5 m
  - Feeder / Diffuser pipe geometries per section:
 

Section # (counting from end: seaward → land)	1	2
x coordinate of centerline at section end [m]	3028	0
y coordinate of centerline at section end [m]	0	0
z coordinate of centerline at section end [m]	-13	0
Diffuser/feeder pipe diameter (Dd,i) [m]	1.108	1.1414
Equivalent sand roughness (Ks,d,i) [m]	0.001	0.001
Radius of bend between sections (R0,i) [m]	0	0
Angle of diameter change btw. sections (beta,i) [°]	0	0
- Port / Riser Configurations:**
  - Number of different port / riser groups (Ng): 1 [-]
  - Group Number (counting from the end): 1
  - Number of risers per group (Ngp): 70 [-]
  - Group located in Section # (SecNo): 1 [-]
  - Spacing between two groups (Lg) [m]: 0
  - space between risers (s) [m]: 5
  - Port elevation (Lr) [m]: 1.5
  - Diameter of riser (Dr) [m]: 0.125
  - Roughness of riser (Ks,r) [m]: 0.0001
  - Number of openings (ports per riser) (Np) [-]: 1
  - Length of port (Lp) [m]: 0
  - Individual port opening diameter (Dp) [m]: 0.125
  - Roughness of port (Ks,p) [m]: 0.0001

Fig. 26: Introdução dos dados no programa CORHYD

Apos a realização da primeira iteração, obteve-se a seguinte mensagem de erro do programa: "Setup leads to saltwater intrusion (negative discharge)". Este erro deve-se à mesma situação encontrada no modelo EPANET, e foi resolvida de igual modo.

## 5.6. ANÁLISE CONJUNTA DOS CENÁRIOS SIMULADOS

Após a modelação do caso de estudo, passa-se à análise dos dados obtidos. Para cada cenário faz-se uma comparação entre os dois modelos, EPANET/ MatLab vs. CORHYD. A seguir representa-se os gráficos do primeiro conjunto, orifícios executados na parede do exutor, com os caudais descarregados para os diferentes cenários simulados:

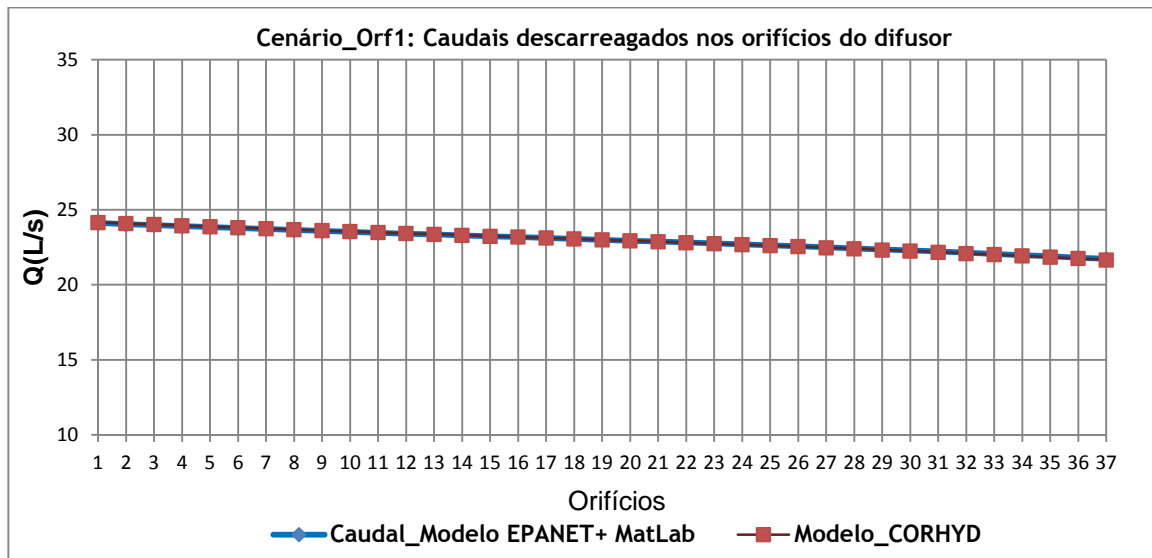


Fig. 27: Simulação do cenário A.1 versão Orifícios

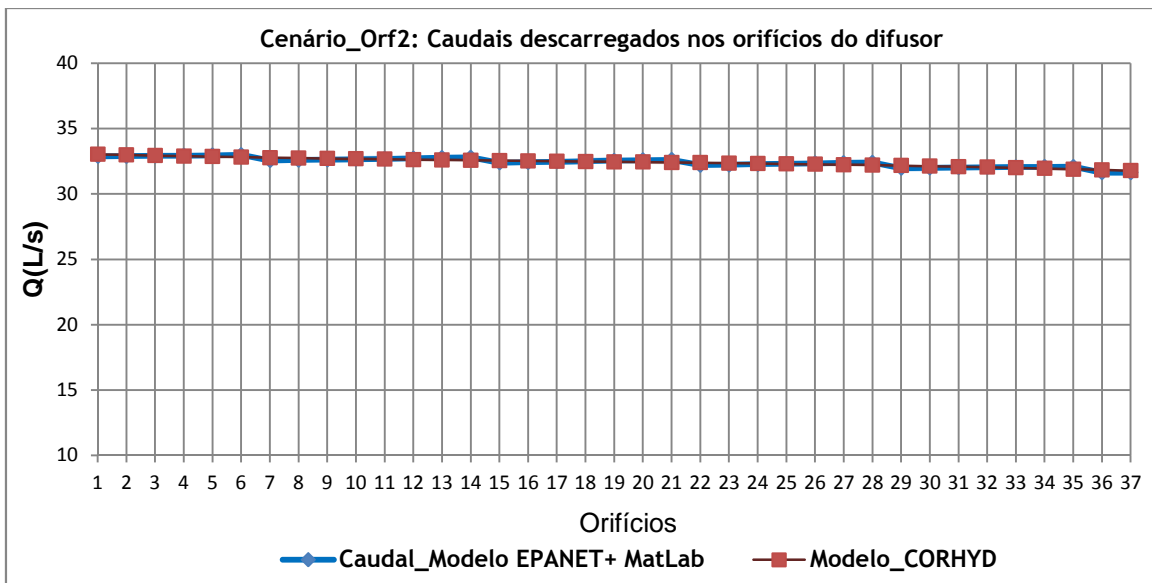


Fig. 28: Simulação do cenário A.2 versão Orifícios

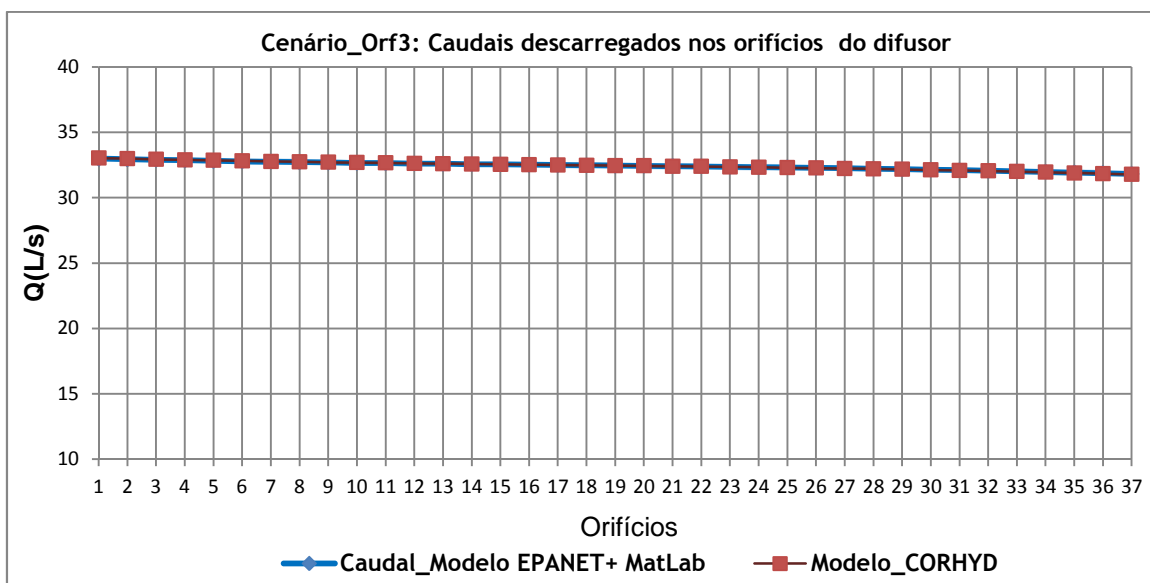


Fig. 29: Simulação do cenário A.3 versão Orifícios

Pela análise do comportamento da descarga, percebe-se que em termos qualitativos a descarga é muito semelhante para os dois programas simulados. Observa-se ainda que os maiores caudais estão a ser descarregados a profundidades menores.

A seguir representa-se um resumo, em tabela, dos dados obtidos para o primeiro conjunto. Para cada um dos cenários indica-se: caudal escoado,  $Q_{\text{exutor}}$ ; a altura da maré; o nível na câmara de carga; o valor médio dos caudais nos orifícios,  $Q_{\text{médio}}$ , e o respetivo desvio padrão.

Tabela 1: Simulações - Resumo de dados e resultados para orifício

Simulação	$Q_{\text{exutor}}$	Altura da Maré	CORHYD			EPANET+MatLab		
			Orifício			Orifício		
			$H_{\text{carga}}$	$Q_{\text{médio}}$	$D_{\text{esv}} \text{ Padrão}$	$H_{\text{carga}}$	$Q_{\text{médio}}$	$D_{\text{esv}} \text{ Padrão}$
	(l/s)	(m [ZH])	(m)	(l/s)	(l/s)	(m)	(l/s)	(l/s)
C_Orf1	850	3.7	5.21	22.97	0.71	5.41	22.97	0.68
C_Orf2	1200	3.7	6.06	32.43	0.33	6.50	32.43	0.35
C_Orf3	1200	0.3	2.57	32.43	0.33	3.01	32.43	0.31

Pela análise da tabela 1 observa-se que a altura de água na câmara de carga,  $H_{\text{carga}}$ , é muito próximo. Nota-se ainda que para o caudal de 1200 l/s a mudança do nível da maré não teve qualquer efeito no comportamento da descarga.

O comportamento da descarga é relativamente satisfatório, uma vez que o máximo desvio dos caudais em relação à média foi de 0.71 l/s, cerca de 3%.

Passa-se agora à análise do segundo conjunto de simulação. Recorda-se que o segundo conjunto refere-se aos cenários já descritos anteriormente, mas com *riser* de altura igual a 1.5 m.

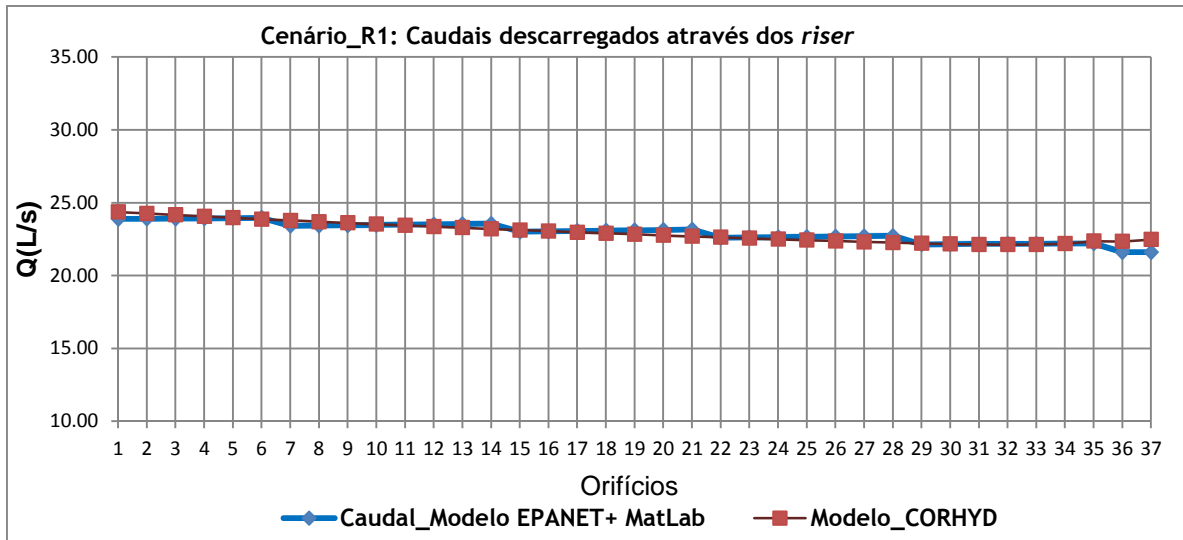


Fig. 30: Simulação do cenário A.1

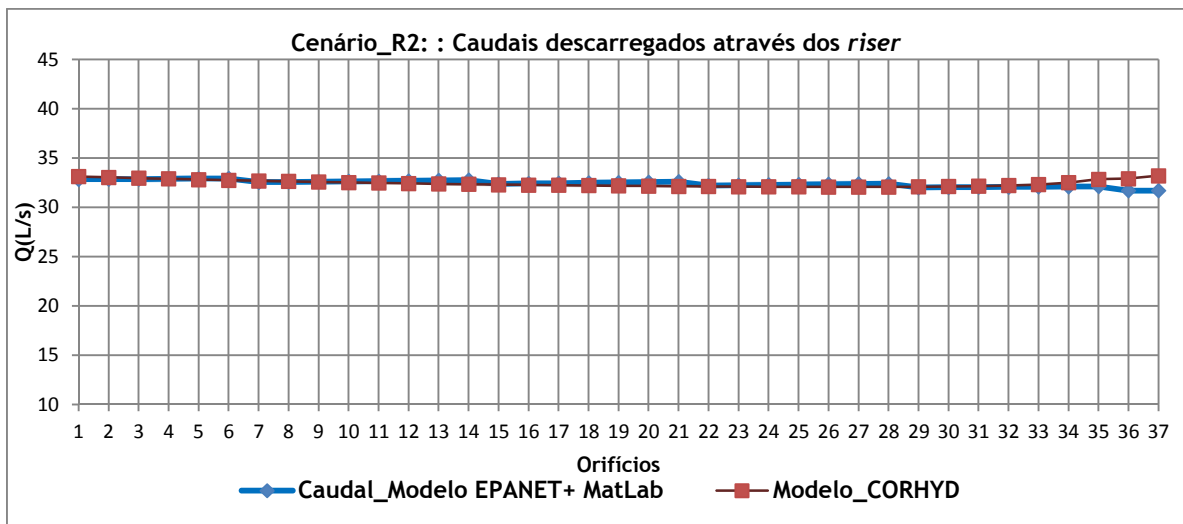


Fig. 31: Simulação do cenário A.2

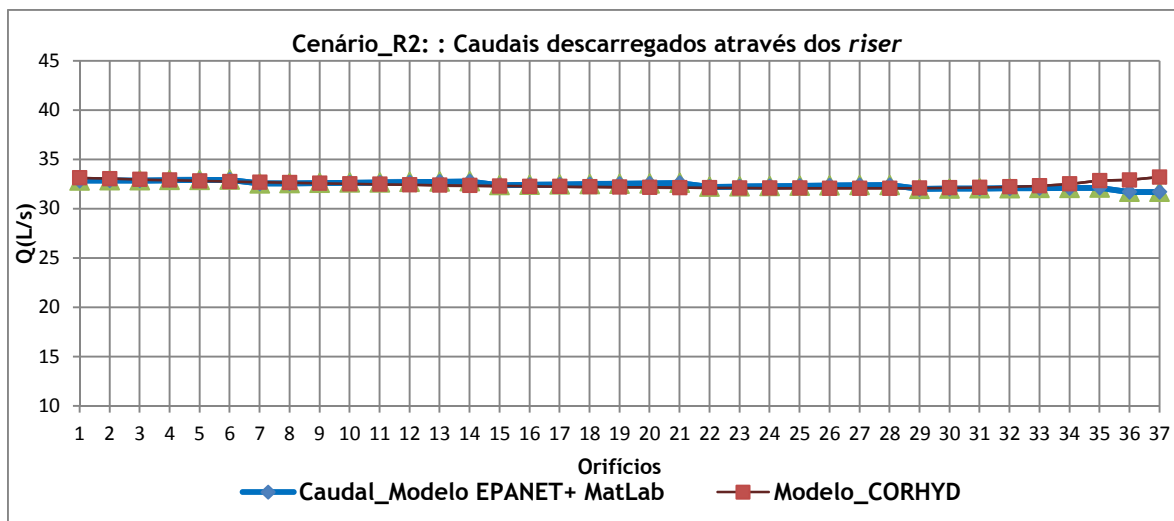


Fig. 32: Simulação do cenário A.3

Pela análise do comportamento da descarga, percebe-se também que em termos qualitativos, a descarga é semelhante, apesar de existir uma pequena variação no comportamento da descarga as maiores profundidades.

A seguir representa-se um resumo, em tabela, dos dados obtidos para o primeiro conjunto. Para cada um dos cenários indica-se: caudal escoado,  $Q_{\text{exutor}}$ ; a altura da maré; o nível na câmara de carga; o valor médio dos caudais nos risers,  $Q_{\text{médio}}$ , e o respetivo desvio padrão.

Tabela 2: Simulações - Resumo de dados e resultados para riser

Simulação	$Q_{\text{exutor}}$	Altura da Maré	CORHYD			EPANET+MatLab		
			Riser			Riser		
			$H_{\text{ccarga}}$	$Q_{\text{médio}}$	$D_{\text{esv}}$ Padrão	$H_{\text{ccarga}}$	$Q_{\text{médio}}$	$D_{\text{esv}}$ Padrão
	(l/s)	(m [ZH])	(m)	(l/s)	(l/s)	(m)	(l/s)	(l/s)
C_R1	850	3.7	5.34	22.97	0.69	5.45	22.97	0.67
C_R2	1200	3.7	6.39	32.43	0.34	6.58	32.43	0.32
C_R3	1200	0.3	2.9	32.43	0.34	3.1	32.43	0.32

A análise à tabela 2 é análoga ao já efetuado na tabela 1.

Os resultados dos caudais descarregados relativos às simulações dos dois conjuntos estão disponíveis em anexo AI. Igualmente são disponibilizados os resultados da simulação com o programa CORHYD.

Após a análise do comportamento hidráulico do exutor submarino, passa-se para a análise da diluição inicial.

A diluição inicial foi estimada de acordo com o exposto no capítulo 3. Recorda-se os cenários considerados na estimativa da diluição inicial:

- **Cenário 1:** a não existência da corrente marítima e da estratificação linear;
- **Cenário 2:** a existência de corrente marítima sem a estratificação linear;
- **Cenário 3:** a não existência de corrente marítima com estratificação densimétrica do linear oceano;
- **Cenário 4:** A existência de corrente marítima com estratificação densimétrica do linear oceano.

O nível de exigência em relação ao valor mínimo diluição inicial não está estipulado na legislação nacional ou europeia. Segundo o IHRH<sup>1</sup> [19] é normalmente aceite um valor de **50**, como garantia de que sobre a descarga, a superfície da água do mar, não tenha um aspeto demasiadamente desagradável.

Para o estudo da diluição inicial, considerou-se o cenário de simulação hidráulica, CA.3, mais exigente do ponto de vista hidráulico e da diluição inicial. Este cenário é exigente porque a o caudal descarregado é maior e a altura disponível para haver diluição é menor. No caso em estudo, o nível de maré é Baixa - mar.

Estão representados nas figuras a seguir os valores da diluição inicial estimados para os vários cenários.

O facto de maiores caudais estarem a ser descarregados não acarreta maiores preocupações, uma vez que a diluição é bastante superior ao valor mínimo indicado pelo IHRH.

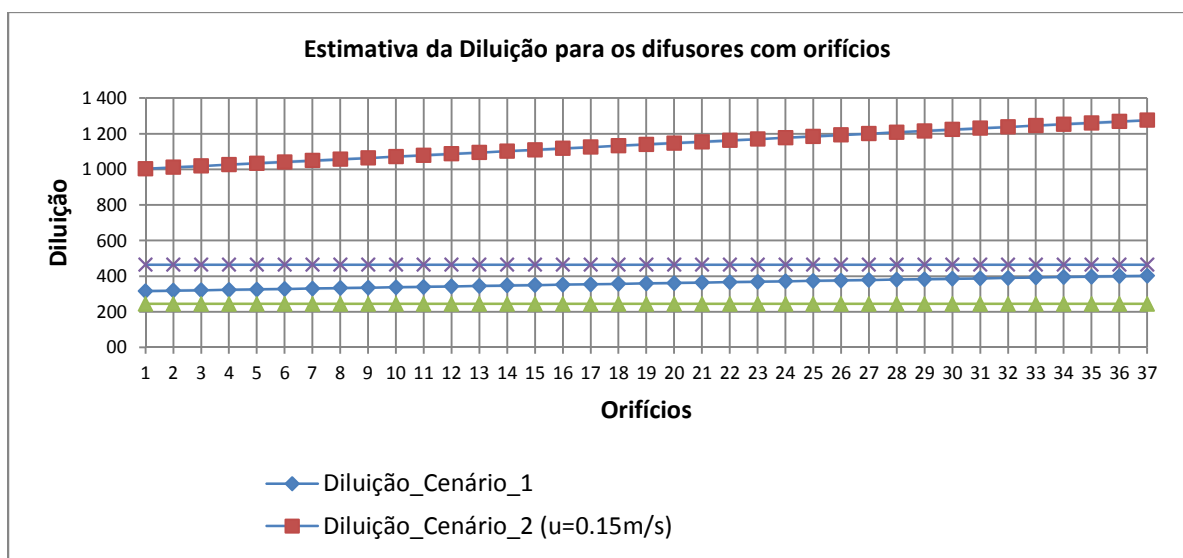


Fig. 33: Valores estimados para a diluição para os Orifícios

<sup>1</sup> Instituto de Hidráulica e Recursos Hídrico

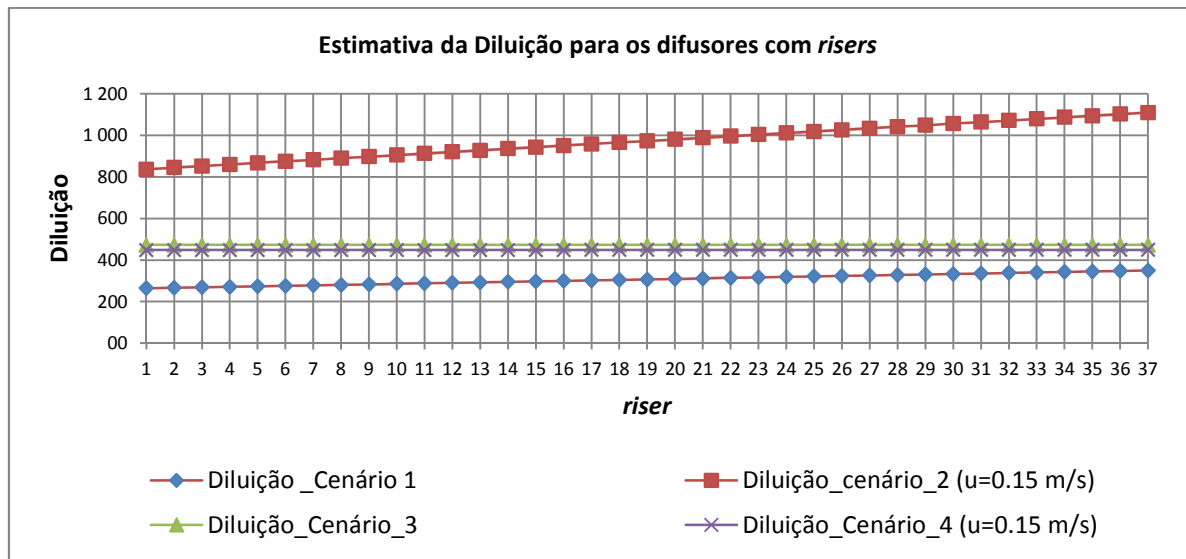


Fig. 34: Valores estimados para a diluição para os risers



## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A conclusão desse trabalho reflete a interpretação do autor, fundamentada na bibliografia consultada e na experiência que o mesmo foi adquirindo ao longo deste trabalho.

### 6.1. CONCLUSÃO

As conclusões têm como base a seguinte questão: **será possível um programa usado para a modelação de rede de distribuição de água ser capaz de modelar um exutor submarino?**

A resposta é sim! É possível utilizar o modelo EPANET + MatLab na simulação da descarga de um exutor. Esta resposta tem por base a seguinte análise:

O comportamento da descarga no modelo EPANET + MatLab revelou-se semelhante ao de um programa utilizado em projetos internacionais de grande relevância;

A conversão do efeito da diferença de densidade numa altura equivalente revelou-se uma **atitude correta**.

O modelo EPANET + MatLab apresenta algumas vantagens em relação ao CORHYD:

O facto de CORHYD considerar somente orifícios igualmente espaçados, torna-se numa desvantagem para um exutor onde isto não acontece, enquanto o modelo EPANET + MatLab consegue realizar simulações para estes casos;

No CORHYD não é possível introduzir a cota real de cada orifício, o programa realiza interpolações lineares entre secções do exutor, o que pode conduzir a resultados incorretos, principalmente se o exutor tiver instalado numa batimetria irregular e a grandes profundidades. Enquanto o modelo EPANET + MatLab permite introduzir a cota real de cada orifício.

O preenchimento dos dados através interface gráfica do CORHYD não permite a representação física da instalação hidráulica que se pretende simular o que pode transformar numa fonte de erros.

### 6.2. DESENVOLVIMENTO DE TRABALHOS FUTUROS

O modelo de cálculo desenvolvido pelo autor atualmente não é, em termos económicos, competitivo, uma vez que, ambos os programas, CORHYD e EPANET + MatLab, foram desenvolvidos em ambiente MatLab, uma linguagem de programação que exige licença de utilização.

O autor considera que o modelo de cálculo desenvolvido torna-se competitivo em relação ao CORHYD se o mesmo for desenvolvido em linguagem de programação tais como: OCTAVE ou FREEMAT, que são linguagens alternativas grátis ao Matlab. O desenvolvimento do programa EXUTOR, atualmente modelo EPANET + MatLab, em OCTAVE ou FREEMAT

implicará a **construção de um novo Toolbox** de comunicação entre o EPANET e o OCTAVE ou FREEMAT.

## 7. REFERÊNCIAS

1. Blenniger Tobias, J.G.H., *User's manual for corhyd: An internal diffuser hydraulics model*. 2005.
2. Cheng, *Apontamentos de Sistema de Drenagem Urbana - Características Qualitativas de Águas Residuais Urbanas*, 2012.
3. Freire, A.A.F.d.L., *Avaliação do Desempenho Ambiental de Sistemas de Tratamento de Águas Residuais Urbanas com Descarga em Zonas Costeiras*. 2007.
4. Cristina Santos , A.B., Pilar Pestana , Ana Cardoso, Alexandre Freire, *Qualidade da Água e dos Sedimentos na zona circundante de oito emissários submarinos – costa oeste de Portugal*. Revista da Gestão Costeira Integrada (2011), 2011.
5. Neves, M.J.V., *Estudo de Jactos Turbulentos*. 1985.
6. António Jorge Monteiro, A.M.A.R.d.S., *Emissários Submarinos - Qualidade da água e Controle da Poluição (Material de Apoio)*. 1998/1999.
7. Vigander, S., Elder, R.A., and Brooks, N.H., *Internal hydraulics of thermal discharge diffusers*. 1970.
8. Neves, M.J.V., *Cálculo Hidráulico de Conduas Perfuradas* 1986.
9. Xiandong Tian, P.R., Gregory J. Daviero, *Marine Wastewater Discharges from Multiport Diffusers I : Unstratified Stationary Water*. 2004.
10. Xiandong Tian, P.R., Gregory J. Daviero, *Marine Wastewater Discharges from Multiport Diffusers II*. 2004
11. Xiandong Tian, P.R., Gregory J. Daviero, *Marine Wastewater Discharges from Multiport Diffusers .III - Stratified Stationary Water*. 2004.
12. Xiandong Tian, P.R., Gregory J. Daviero, *Marine Wastewater Discharges from Multiport Diffusers .IV - Stratified Flowing Water*. 2004.
13. Norge, P., *Technical Catalogue for Submarine Installations of Polyethylene Pipes*, 2002.
14. Vieira, A., *MatLab Dll Link -Manual de Sintaxe ,FEUP/DEC/SHRHA*. 2007.
15. UNESCO, M.J.-. *Algorithms for Computation of fundamental properties of Seawater*. UNESCO Tecnical Papers in Marine Science, 1983.

16. Bleninger Tobias, L.G., Gerhard H. Jirka, *Design and optimization program for internal diffuser hydraulics*. 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON MARINE WASTE WATER DISCHARGES, 2002.
17. Barbosa, J.N., *Mecânica dos fluidos e hidráulica geral*. 1985. **1**.
18. Lencastre, A., *Hidráulica Geral*. 1996.
19. IHRH, *Plano Director de Drenagem e Tratamento de Águas Residuais do Concelho de Matosinhos - Campanhas Marítimas e Simulações*. 1990.





# **ANEXO**





## **Anexo A1**

### **Resultados obtidos no caso de estudo**

QA1.1 – Caudais descarregados para os orifícios (C\_A1)

#	Modelo _EPANET+MatLab		Modelo _CORHYD	
	Q	U m/s	Q (l/s)	U m/s
	(l/s)	(m/s)	l/s	(m/s)
1	24.12	1.97	24.16	1.969
2	24.04	1.96	24.09	1.963
3	23.98	1.95	24.02	1.957
4	23.91	1.95	23.95	1.952
5	23.84	1.94	23.88	1.946
6	23.78	1.94	23.82	1.941
7	23.72	1.93	23.75	1.935
8	23.65	1.93	23.68	1.93
9	23.59	1.92	23.62	1.925
10	23.53	1.92	23.56	1.92
11	23.47	1.91	23.49	1.915
12	23.41	1.91	23.43	1.909
13	23.35	1.9	23.37	1.904
14	23.29	1.9	23.31	1.899
15	23.24	1.89	23.25	1.894
16	23.18	1.89	23.19	1.89
17	23.12	1.88	23.13	1.885
18	23.06	1.88	23.06	1.879
19	23	1.87	23	1.874
20	22.94	1.87	22.94	1.869
21	22.88	1.86	22.88	1.864
22	22.82	1.86	22.81	1.859
23	22.76	1.85	22.75	1.854
24	22.69	1.85	22.68	1.848
25	22.63	1.84	22.62	1.843
26	22.56	1.84	22.55	1.837
27	22.5	1.83	22.48	1.832
28	22.43	1.83	22.41	1.826
29	22.36	1.82	22.33	1.82
30	22.29	1.82	22.26	1.814
31	22.22	1.81	22.18	1.807
32	22.14	1.8	22.1	1.801
33	22.06	1.8	22.02	1.794
34	21.98	1.79	21.94	1.788
35	21.9	1.78	21.85	1.781
36	21.81	1.78	21.76	1.773
37	21.73	1.77	21.67	1.766

QA1.2 – Caudais descarregados para os orifícios (C\_A2)

#	Modelo _EPANET+MatLab		Modelo_CORHYD	
	Q	U m/s	Q (l/s)	U m/s
	(l/s)	(m/s)	l/s	(m/s)
1	32.88	2.68	33.02	2.691
2	32.89	2.68	32.98	2.687
3	32.91	2.68	32.93	2.683
4	32.93	2.68	32.89	2.68
5	32.95	2.69	32.85	2.677
6	32.98	2.69	32.81	2.674
7	32.56	2.65	32.77	2.671
8	32.59	2.66	32.74	2.668
9	32.62	2.66	32.71	2.665
10	32.65	2.66	32.68	2.663
11	32.68	2.66	32.65	2.661
12	32.72	2.67	32.62	2.658
13	32.76	2.67	32.6	2.656
14	32.79	2.67	32.57	2.654
15	32.38	2.64	32.55	2.652
16	32.42	2.64	32.52	2.65
17	32.46	2.64	32.5	2.648
18	32.5	2.65	32.47	2.646
19	32.54	2.65	32.45	2.644
20	32.58	2.65	32.43	2.642
21	32.61	2.66	32.4	2.64
22	32.2	2.62	32.38	2.638
23	32.23	2.63	32.35	2.636
24	32.27	2.63	32.32	2.634
25	32.31	2.63	32.29	2.631
26	32.34	2.64	32.26	2.629
27	32.37	2.64	32.23	2.626
28	32.4	2.64	32.2	2.624
29	31.97	2.6	32.16	2.621
30	31.99	2.61	32.12	2.617
31	32.02	2.61	32.08	2.614
32	32.04	2.61	32.04	2.611
33	32.06	2.61	31.99	2.607
34	32.07	2.61	31.94	2.603
35	32.08	2.61	31.89	2.599
36	31.63	2.58	31.83	2.594
37	31.63	2.58	31.77	2.589

QA1.3 – Caudais descarregados para os orifícios (C\_A3)

#	Modelo _EPANET+MatLab		Modelo _CORHYD	
	Q	U m/s	Q (l/s)	U m/s
	(l/s)	(m/s)	l/s	(m/s)
1	32.99	2.69	33.02	2.691
2	32.94	2.68	32.98	2.687
3	32.9	2.68	32.93	2.683
4	32.86	2.68	32.89	2.68
5	32.82	2.67	32.85	2.677
6	32.78	2.67	32.81	2.674
7	32.75	2.67	32.77	2.671
8	32.72	2.67	32.74	2.668
9	32.69	2.66	32.71	2.665
10	32.66	2.66	32.68	2.663
11	32.64	2.66	32.65	2.661
12	32.61	2.66	32.62	2.658
13	32.59	2.66	32.6	2.656
14	32.56	2.65	32.57	2.654
15	32.54	2.65	32.55	2.652
16	32.52	2.65	32.52	2.65
17	32.5	2.65	32.5	2.648
18	32.47	2.65	32.47	2.646
19	32.45	2.64	32.45	2.644
20	32.43	2.64	32.43	2.642
21	32.41	2.64	32.4	2.64
22	32.38	2.64	32.38	2.638
23	32.36	2.64	32.35	2.636
24	32.33	2.63	32.32	2.634
25	32.31	2.63	32.29	2.631
26	32.28	2.63	32.26	2.629
27	32.25	2.63	32.23	2.626
28	32.21	2.62	32.2	2.624
29	32.18	2.62	32.16	2.621
30	32.14	2.62	32.12	2.617
31	32.11	2.62	32.08	2.614
32	32.06	2.61	32.04	2.611
33	32.02	2.61	31.99	2.607
34	31.97	2.61	31.94	2.603
35	31.92	2.6	31.89	2.599
36	31.87	2.6	31.83	2.594
37	31.81	2.59	31.77	2.589

QA1.4 – Caudais descarregados para os *risers* (C\_A1)

#	Modelo _EPANET+MatLab		Modelo _CORHYD	
	Q (l/s)	U (m/s)	Q (l/s)	U (m/s)
1	23.89	1.95	24.36	1.985
2	23.9	1.95	24.26	1.976
3	23.91	1.95	24.16	1.968
4	23.92	1.95	24.06	1.96
5	23.94	1.95	23.96	1.953
6	23.96	1.95	23.87	1.945
7	23.41	1.91	23.78	1.938
8	23.43	1.91	23.69	1.931
9	23.45	1.91	23.61	1.924
10	23.47	1.91	23.52	1.917
11	23.49	1.91	23.44	1.91
12	23.51	1.92	23.36	1.903
13	23.54	1.92	23.28	1.897
14	23.56	1.92	23.2	1.89
15	23.01	1.87	23.12	1.884
16	23.03	1.88	23.05	1.878
17	23.06	1.88	22.97	1.872
18	23.08	1.88	22.9	1.866
19	23.11	1.88	22.83	1.86
20	23.13	1.89	22.76	1.855
21	23.16	1.89	22.69	1.849
22	22.59	1.84	22.62	1.844
23	22.62	1.84	22.56	1.838
24	22.64	1.84	22.49	1.833
25	22.66	1.85	22.43	1.828
26	22.68	1.85	22.37	1.823
27	22.7	1.85	22.31	1.818
28	22.72	1.85	22.26	1.814
29	22.14	1.8	22.21	1.81
30	22.15	1.81	22.16	1.806
31	22.17	1.81	22.13	1.803
32	22.18	1.81	22.12	1.802
33	22.19	1.81	22.13	1.803
34	22.2	1.81	22.19	1.808
35	22.21	1.81	22.36	1.822
36	21.6	1.76	22.34	1.821
37	21.6	1.76	22.47	1.831

QA1.5 – Caudais descarregados para os risers (C\_A2)

#	Modelo_EPANET+MatLab		Modelo_CORHYD	
	Q (l/s)	U (m/s)	Q (l/s)	U (m/s)
1	32.84	2.68	33.12	2.699
2	32.86	2.68	33.04	2.692
3	32.87	2.68	32.96	2.686
4	32.89	2.68	32.89	2.68
5	32.91	2.68	32.81	2.674
6	32.93	2.68	32.75	2.669
7	32.55	2.65	32.69	2.663
8	32.57	2.65	32.63	2.659
9	32.6	2.66	32.57	2.654
10	32.63	2.66	32.52	2.65
11	32.66	2.66	32.47	2.646
12	32.69	2.66	32.42	2.642
13	32.73	2.67	32.38	2.639
14	32.76	2.67	32.34	2.635
15	32.38	2.64	32.3	2.632
16	32.42	2.64	32.27	2.63
17	32.45	2.64	32.24	2.627
18	32.49	2.65	32.21	2.625
19	32.53	2.65	32.18	2.622
20	32.56	2.65	32.16	2.62
21	32.6	2.66	32.14	2.619
22	32.22	2.63	32.12	2.617
23	32.25	2.63	32.1	2.616
24	32.28	2.63	32.09	2.615
25	32.32	2.63	32.08	2.614
26	32.35	2.64	32.07	2.613
27	32.38	2.64	32.07	2.613
28	32.4	2.64	32.07	2.613
29	32.01	2.61	32.08	2.614
30	32.03	2.61	32.11	2.616
31	32.05	2.61	32.15	2.62
32	32.07	2.61	32.21	2.625
33	32.09	2.61	32.32	2.634
34	32.1	2.62	32.5	2.648
35	32.11	2.62	32.85	2.677
36	31.7	2.58	32.91	2.682
37	31.7	2.58	33.2	2.705

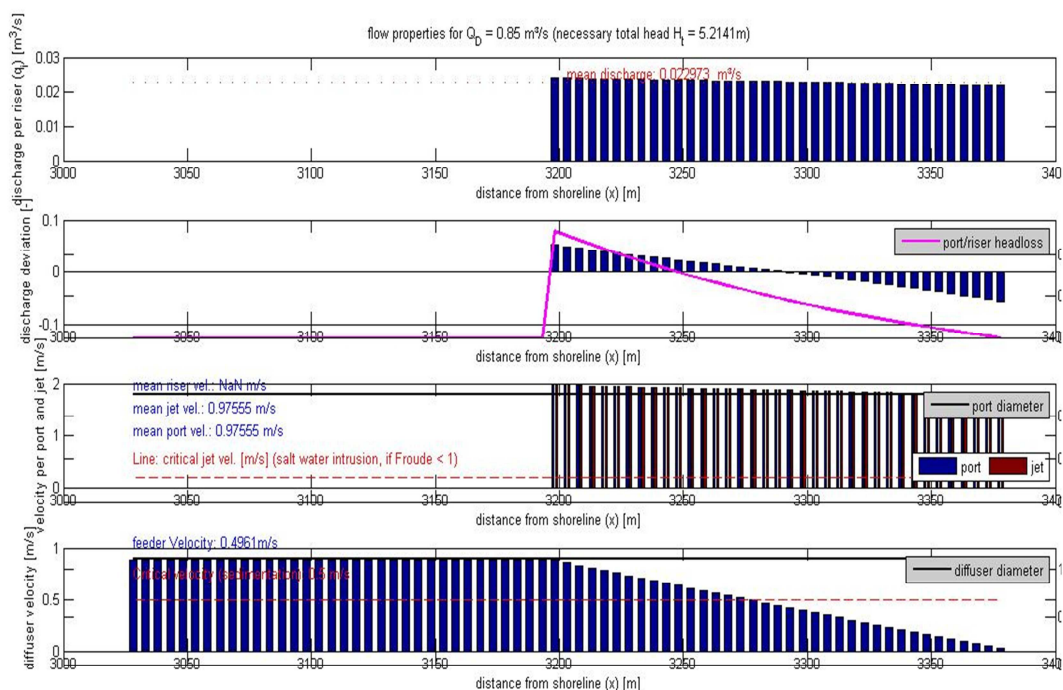
QA1.5 – Caudais descarregados para os risers (C\_A3)

#	Modelo _EPANET+MatLab		Modelo _CORHYD	
	Q (l/s)		Q (l/s) velocidade	
1	32.84	2.68	33.12	2.699
2	32.86	2.68	33.04	2.692
3	32.87	2.68	32.96	2.686
4	32.89	2.68	32.89	2.68
5	32.91	2.68	32.81	2.674
6	32.93	2.68	32.75	2.669
7	32.55	2.65	32.69	2.663
8	32.57	2.65	32.63	2.659
9	32.6	2.66	32.57	2.654
10	32.63	2.66	32.52	2.65
11	32.66	2.66	32.47	2.646
12	32.7	2.66	32.42	2.642
13	32.73	2.67	32.38	2.639
14	32.76	2.67	32.34	2.635
15	32.38	2.64	32.3	2.632
16	32.42	2.64	32.27	2.63
17	32.46	2.64	32.24	2.627
18	32.49	2.65	32.21	2.625
19	32.53	2.65	32.18	2.622
20	32.56	2.65	32.16	2.62
21	32.6	2.66	32.14	2.619
22	32.22	2.63	32.12	2.617
23	32.25	2.63	32.1	2.616
24	32.28	2.63	32.09	2.615
25	32.31	2.63	32.08	2.614
26	32.35	2.64	32.07	2.613
27	32.38	2.64	32.07	2.613
28	32.4	2.64	32.07	2.613
29	32.01	2.61	32.08	2.614
30	32.03	2.61	32.11	2.616
31	32.05	2.61	32.15	2.62
32	32.07	2.61	32.21	2.625
33	32.09	2.61	32.32	2.634
34	32.1	2.62	32.5	2.648
35	32.11	2.62	32.85	2.677
36	31.7	2.58	32.91	2.682
37	31.7	2.58	33.2	2.705

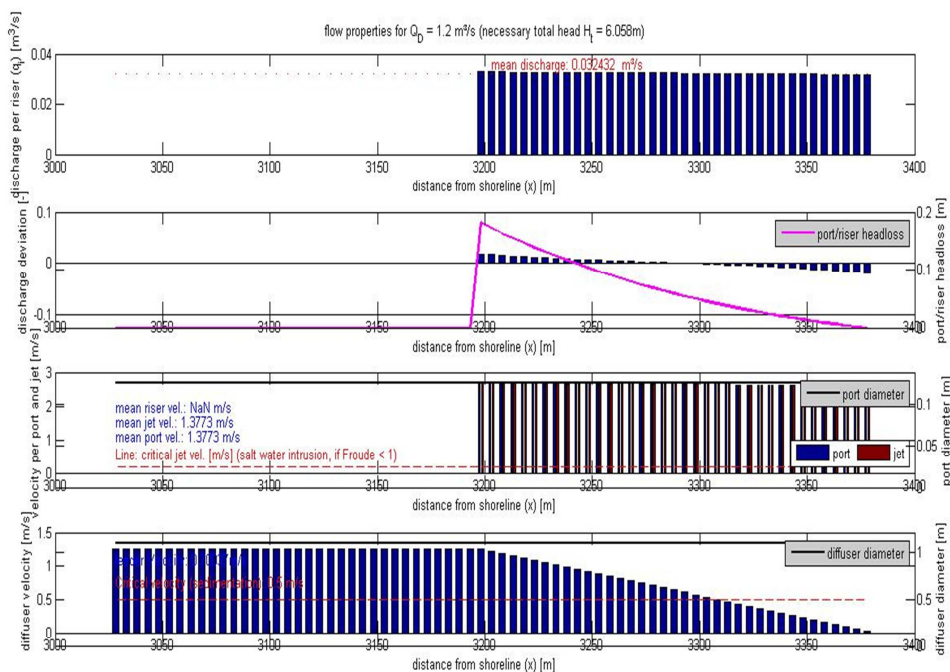




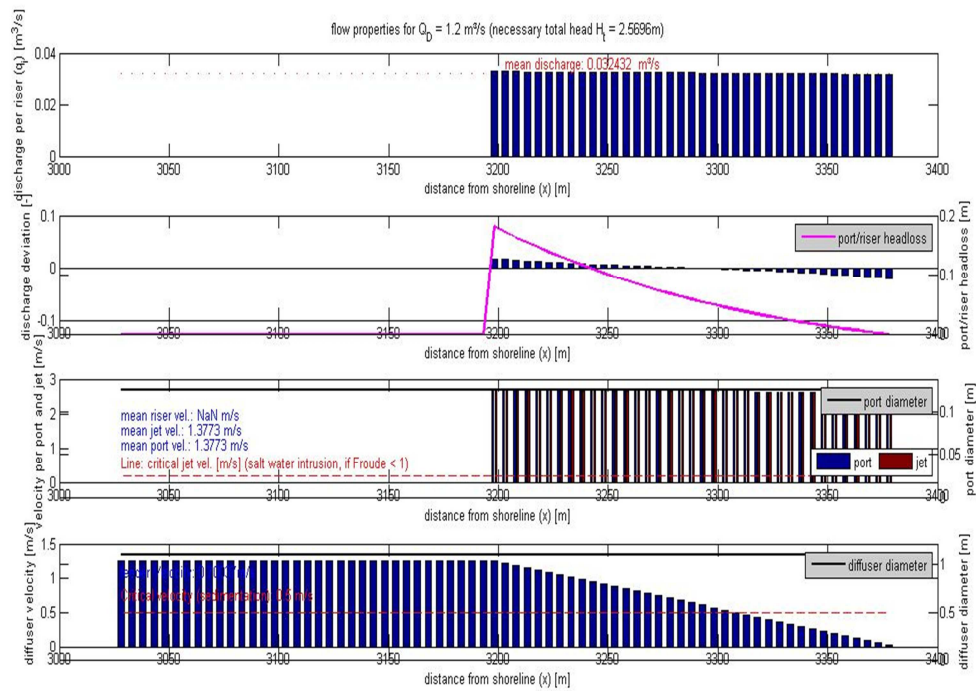
**Anexo A2**  
**Resultados de saída do**  
**programa CORHYD**



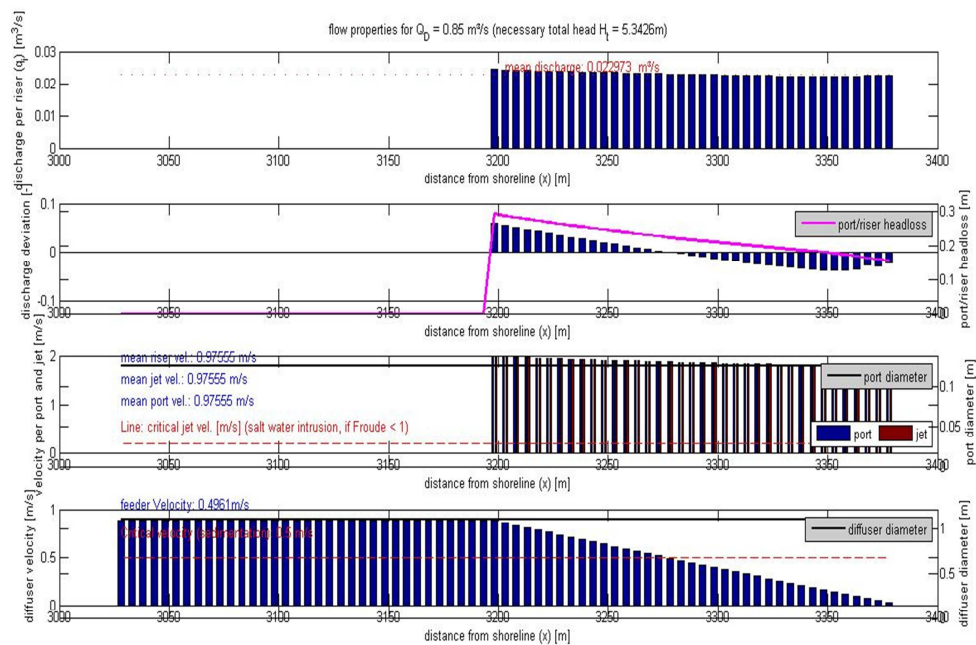
Cenário orifício 1- Caudal a descarregar 850 l/s; altura da maré 3.7 m.



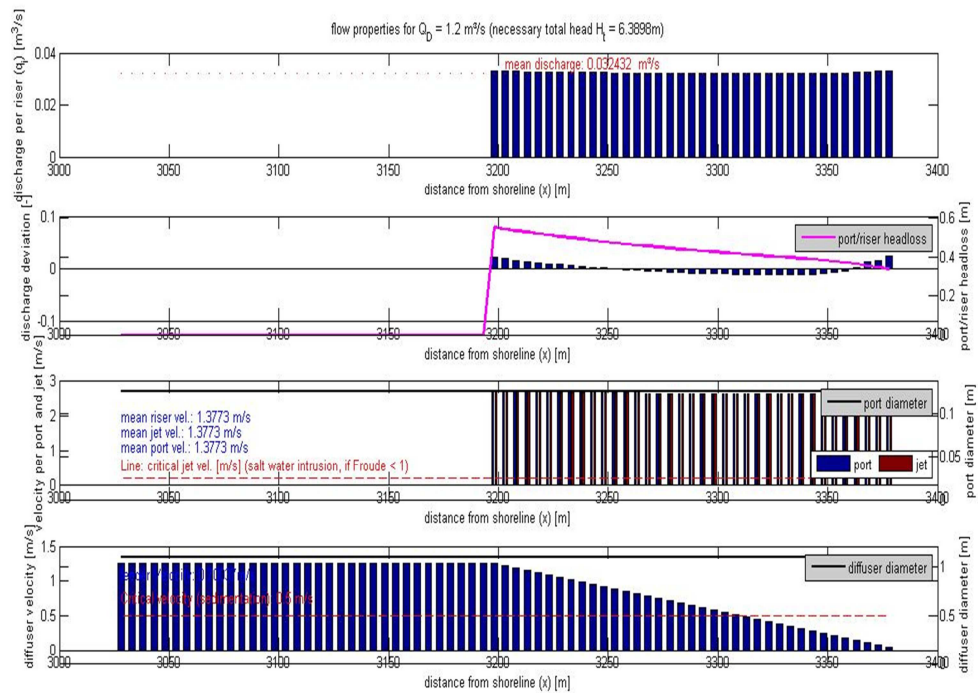
Cenário orifício 2- Caudal a descarregar 1200 l/s; altura da maré 3.7 m.



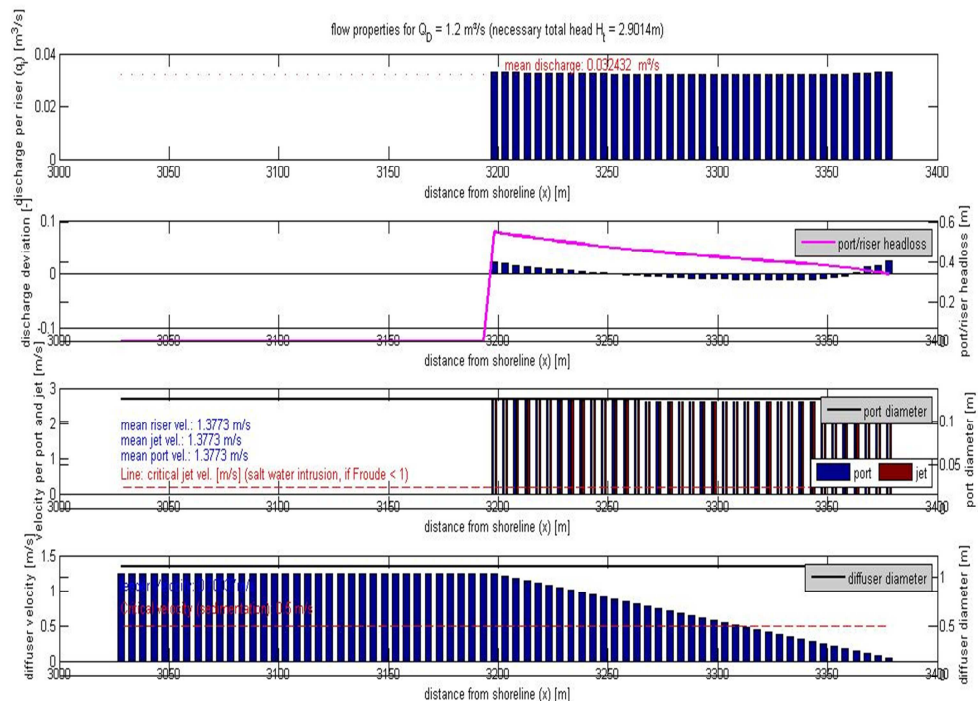
Cenário orifício 3- Caudal a descarregar 1200 l/s; altura da maré 0.3 m.



Cenário riser 1- Caudal a descarregar 850 l/s; altura da maré 3.7 m.



Cenário *riser 2*- Caudal a descarregar 120 l/s; altura da maré 3.7 m.



Cenário *riser 3*- Caudal a descarregar 120 l/s; altura da maré 0.3 m.





## **Anexo A3**

### **Resultados obtidos da diluição**

Posição dos orifícios	Orifícios			
	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
	-	Ua =0.15	-	Ua =0.15
	Sn	Sn	Sn	Sn
1	316.2	1003.0	243.9	464.2
2	318.6	1010.9	244.0	464.2
3	320.9	1018.1	244.0	464.2
4	323.4	1026.0	244.0	464.2
5	325.7	1033.3	244.0	464.2
6	328.2	1041.1	244.0	464.2
7	330.5	1048.4	244.0	464.3
8	333.0	1056.3	244.0	464.3
9	335.3	1063.6	244.0	464.3
10	337.7	1071.4	244.0	464.3
11	340.0	1078.7	244.1	464.3
12	342.5	1086.5	244.1	464.3
13	344.8	1093.8	244.1	464.3
14	347.3	1101.7	244.1	464.4
15	349.6	1109.0	244.1	464.4
16	352.0	1116.8	244.1	464.4
17	354.3	1124.1	244.1	464.4
18	356.8	1132.0	244.1	464.4
19	359.1	1139.2	244.1	464.4
20	361.6	1147.1	244.1	464.4
21	363.9	1154.4	244.2	464.5
22	366.4	1162.2	244.2	464.5
23	368.7	1169.5	244.2	464.5
24	371.1	1177.4	244.2	464.5
25	373.4	1184.7	244.2	464.5
26	375.9	1192.5	244.2	464.5
27	378.2	1199.8	244.2	464.5
28	380.7	1207.6	244.2	464.6
29	383.0	1214.9	244.2	464.6



30	385.4	1222.8	244.2	464.6
31	387.7	1230.1	244.3	464.6
32	390.2	1237.9	244.3	464.6
33	392.5	1245.2	244.3	464.6
34	395.0	1253.1	244.3	464.7
35	397.3	1260.3	244.3	464.7
36	399.8	1268.2	244.3	464.7
37	402.1	1275.5	244.3	464.7

Posição dos orifícios	<i>Riser</i>			
	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
		Ua =0.15		Ua =0.15
	Sn	Sn	Sn	Sn
1	263.8	836.9	472.8	448.4
2	266.3	844.7	472.8	448.4
3	268.6	852.0	472.8	448.4
4	271.1	859.9	472.8	448.5
5	273.4	867.2	472.9	448.5
6	275.8	875.0	472.9	448.5
7	278.1	882.3	472.9	448.5
8	280.6	890.2	472.9	448.5
9	282.9	897.4	472.9	448.5
10	285.4	905.3	472.9	448.5
11	287.7	912.6	472.9	448.6
12	290.1	920.4	472.9	448.6
13	292.4	927.7	472.9	448.6
14	294.9	935.6	472.9	448.6
15	297.2	942.9	472.9	448.6
16	299.7	950.7	472.9	448.6
17	302.0	958.0	472.9	448.7
18	304.5	965.8	472.9	448.7
19	306.8	973.1	472.9	448.7
20	309.2	981.0	472.9	448.7
21	311.5	988.3	472.9	448.7
22	314.0	996.1	472.9	448.7
23	316.3	1003.4	472.9	448.7
24	318.8	1011.3	473	448.8
25	321.1	1018.6	473	448.8
26	323.5	1026.4	473	448.8
27	325.8	1033.7	473	448.8
28	328.3	1041.5	473	448.8
29	330.6	1048.8	473	448.8
30	333.1	1056.7	473	448.8

31	335.4	1064.0	473	448.9
32	337.9	1071.8	473	448.9
33	340.2	1079.1	473	448.9
34	342.6	1086.9	473	448.9
35	344.9	1094.2	473	448.9
36	347.4	1102.1	473	448.9
37	349.7	1109.4	473	448.9